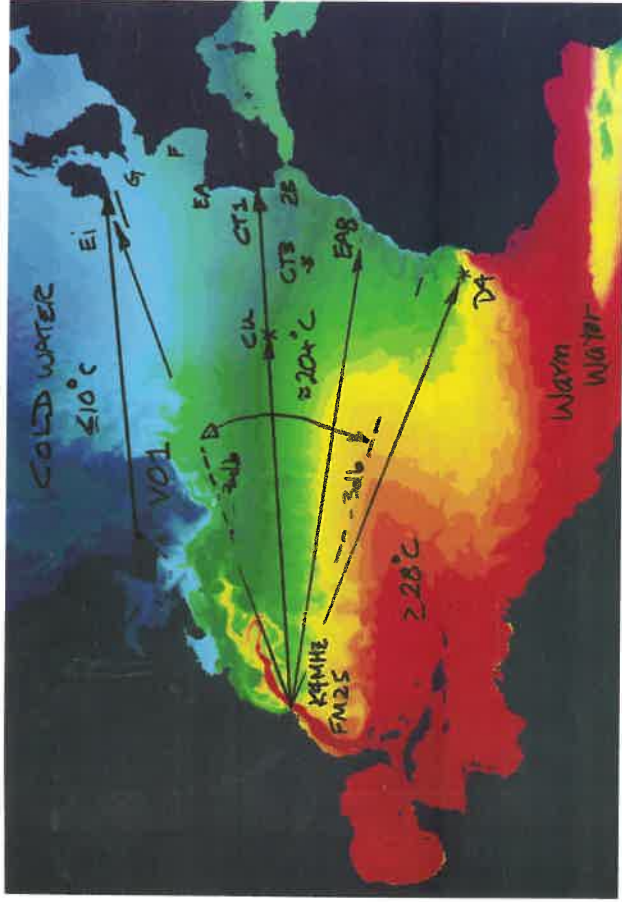


DUBUS

4/2008

Vol. 37 4. Quarter

Over-the-Horizon Optical Communication



Path study for the new K4MHZ/B
2m transatlantic beacon on 144.300 MHz



DL7APV's new 16 x 9 w/ DJ9BV EME array for 70cm

This is the final issue of the year 2008, please check page 3 for 2009 renewal details!

www.DUBUS.org www.DUBUS.de info@DUBUS.de

Over-The-Horizon Optical Communication

Part 1: Overview and Practical Results

by Rex Moncur, VK7MO, Justin Giles-Clark, VK7TW and Ken Sulman, VK7DY

Distances of up to 118 km have been achieved with the digital mode JT65a on cloudbounce propagation at a frequency of 478 THz (Red Light) using banks of Light Emitting Diodes (LEDs) focused by small plastic lenses as used in torches and a large area avalanche photo diode (APD) receiver. Extensive propagation experiments have been conducted over a distance of 27 km using a single LED at MHz bandwidths. The success of this work relies on the use of relatively wide bandwidths (up to 10 degrees) to overcome the difficulty of alignment on clouds, the use of new higher power Luxeon¹ Light Emitting Diodes, large (395 x 395 mm) plastic Fresnel lenses to capture as much light as possible combined with narrow bandwidth digital modes and low noise receivers. All our work is conducted at night as our receivers are overloaded by even twilight.

For those who wish to follow the theory or construct their own systems additional information will be provided in subsequent DUBUS volumes as follows:

Part 2 Theory: will cover the theory of over-the-horizon optical propagation from clouds, the theory of transmitter and receiver performance and relate the theory to our practical results.

Part 3 Transmitters: will discuss options and provide sufficient detail for construction of some viable options.

Part 4 Receivers: will discuss options and provide sufficient detail for construction of some viable options.

Background

Mike Groth, VK7MJ, and Chris Long, VK3AML², have pioneered the use of Luxeon LED transmitters and low noise receivers using Fresnel lenses for line of sight optical communication. On the 19th February 2005 Mike and Chris achieved a distance of 167 km between two mountains in Tasmania, Australia. These techniques were taken further with a lower noise receiver³ by Clint Turner, KA7OEI, to set a line of sight distance record of 278 km between high mountains in Utah USA on October 3, 2007. In late 2006 we started to examine options for non-line-of-sight optical communication and also added the use Joe Taylor, K1JT's, WSJT⁴ computer program as a means of bringing the much weaker signals out of the noise. For our MHz

¹ Luxeon is a trade name for a Light Emitting Diode with enhanced optical output, which is manufactured by the Philips Lumileds Lighting Company. <http://www.luxeon.com/>

² Information on the work of VK7MJ and VK3AML, is at: http://imodulatedlight.org/Modulated_Light_DX/Modulated_LIGHT_DX.html

³ An excellent article on the development of low noise receivers by KA7OEI is at: http://imodulatedlight.org/optical_comms/optical_rx1.html

⁴ K1JT's WSJT computer program is available at: <http://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/>

bandwidth propagation experiments we used the audio analysis computer program, Spectrum Lab⁵, by Wolfgang Buescher, DL4YHF, which allows one to automatically record data such as signal and noise levels and frequency.

Lenses

Lenses are analogous to antennas in the optical world. With small plastic lenses as used in torches one can achieve optical gains of around 24 dBi with beamwidths of around 10 degrees. Much higher gains can be achieved with plastic Fresnel lenses of the type used to assist the sight impaired with reading or larger ones as used with overhead projectors. Large 395 x 395 mm plastic Fresnel Lenses give optical gains of around 50 dBi but with the beamwidth narrowed to less than one degree dependent on the detector size.

Scattering from Clouds

Our first experiments used VK7MJ's narrow beamwidth (less than one degree) transceivers. These experiments were conducted over a 1.2 km non-line-of-sight path between the QTHs of VK7MO and VK7TW. We soon discovered that it is impractical to align a narrow beamwidth receiver and transmitter at the same point on a cloud. To ease the problem of alignment, it is necessary to increase the transmitter beamwidth. But this does mean reduced optical gain and system performance. The reduced performance can be made up by using weak signal digital modes and by increasing the power. While we experimented with high power incandescent projector lamps using mechanical modulation, mercury vapour tubes and different types of LEDs the major breakthrough was to use the Luxeon III LEDs with small plastic torch lenses (10 degree beamwidth) and then to increase the power by using them in banks.

Interestingly, the issue of alignment on clouds becomes easier at longer distances. This is because at short distances of a few km the elevation angle to the clouds can vary widely - up to 60 degrees or more. However, at long distances such as 50 km the cloud height limits the possible elevation angles to one or two degrees and a narrow vertical beamwidth can cover the full range of possible elevations by beaming just above the horizon. Aside from the problems of alignment it is best to use as narrow a beamwidth as practical to increase the optical gain and thus system performance. Taking both alignment and system performance into account we are of the view that the optimum transmitter beamwidth is around 10 degrees for distances up to 20 km, 5 degrees for 20 to 60 km and one or two degrees beyond 60 km. Beyond 60 km the limiting factor becomes horizontal beamwidth as it is difficult to align two systems to much better than a degree when there is no distant point to aim at. On the receiver side best performance will generally result from having the receiver beamwidth matched to that of the transmitter.

A second useful issue at longer distances is that the clouds tend to average out the signal such that even with minimal cloud cover signals are usually quite consistent in signal strength. Whereas at shorter distances the signal frequently drops out completely due to gaps between the clouds.

Luxeon LED Transmitter

We use a Lumiled Luxeon type LXHL-LD3C which gives maximum light output at 627 nm or red light, this model comes with a small aluminium heat transfer arrangement called a Luxeon Star and produces around half a watt average light output. A number of companies produce small plastic lenses and holders designed for Luxeons. We use the L2 Optics⁶ type L2OP005 lens and L2OHS35 holder. These lenses are 20 mm in diameter and give around 85% efficiency with a 10 degree beamwidth or around 24 dBi optical gain. Because of their small size and relatively low

⁵ DL4YHF's Spectrum Lab Program is available at: <http://freenet-homepage.de/dl4yhf/spectra1.html>

⁶ <http://www.l2optics.com/>

price it is quite practical to build a 60 Luxeon array to increase power (refer cover photo on this edition of DUBUS). While as stated above it would be better to use narrower beamwidths for long path lengths the problem becomes one of requiring larger lenses to narrow the beamwidth and then with large numbers the overall size becomes an issue.

The red Luxeons are rated at a maximum peak current of 2.2 Amps, have a voltage drop of around 3.1 Volts and have an optical efficiency of about 16%. Modulation is square wave provided by high current MOSFETs (IRF 1405). It is much easier to produce high currents with FET switches in square wave mode than build a linear modulator. The only issue with this approach is that by using square waves you do produce audio harmonics but this is not a problem with JT65a as the harmonics of the lowest tones are well above the highest fundamental tone. As JT65a produces a sine wave output it is necessary to convert this to square waves to drive the MOSFETs.

Something for Nothing

In testing the 60 Luxeon array we compared the performance with one bank of 30 Luxeons and then doubled the power by connecting the second bank of 30. We were surprised to find that doubling the power improved the signal to noise ratio by 6 dB. Coming from a radio frequency background this seemed to us like something for nothing so we called this the "Something for Nothing" Law. However, there is a good reason for this. Each time you double the power of the transmitter you double the number of photons at the detector. At the detector each received photon (if it was 100% efficient) releases one electron. The electrons produce a proportional current in the load resistance across the photo-diode. Thus when you double the transmitter power you double the voltage across load resistor. Then according to $P = V^2/R$ you get four times the signal power or a 6 dB improvement in Signal to Noise Ratio. Accordingly, our 60 Luxeon array increases the Signal to Noise ratio by $20 \cdot \text{LOG}_{10}(60)$ or 35 dB over that of a single unit.

However, the downside is that if you reduce the received photons at the detector by half, say by trying to work over a longer distance, then the signal to noise ratio falls by 6 dB. Unfortunately, it is generally the case that we as hams like to try and work with weaker and weaker signals and thus the "Something for Nothing" Law actually works in reverse for us.

Improving Receiver Performance

When using photo-diodes the receiver performance is generally limited by the noise of the pre-amp. Clint Turner, KA7OEI's web site⁷ gives a great review of developments in pre-amp design, leading to his significantly enhanced receiver. The critical issue is that the signal to noise performance of a pre-amp is primarily a function of the load resistance across the photo-diode and the higher the resistance the better. This is because the same photo-diode current produces a larger voltage output according to $V=IR$. While we can achieve load resistances of tens to hundreds of meg ohms with FETs the problem is that at such high values of load resistance the small capacitance (a few pico farads) of the photodiode causes frequency roll off in the required audio range. Clint's solution, (which is well known in the literature on fibre optic communication) is to feed the signal through an op-amp differentiator to recover the frequency response. We built up one of Clint's pre-amps and were pleased to find performance improved by some 14 dB.

We then looked at whether we could gain further improvements by using multiple photo-diodes behind the same Fresnel lens, with separate KA7OEI pre-amps and then summing the outputs. Our thinking was that we could double the current with each doubling of photo diodes (6 dB power increase) but as the noise which is generated by separate pre-amps is not coherent it should only increase by 3 dB. Thus in going to multiple (N) photo diodes we should get an improvement of $10 \cdot \text{LOG}_{10}(N)$. For 35 photo-diodes this should be 15.4 dB. In practice 35 photo-diodes (fig 1) gave a 14 dB improvement.

⁷ http://modulatedlight.org/optical_commns/optical_rx1.html

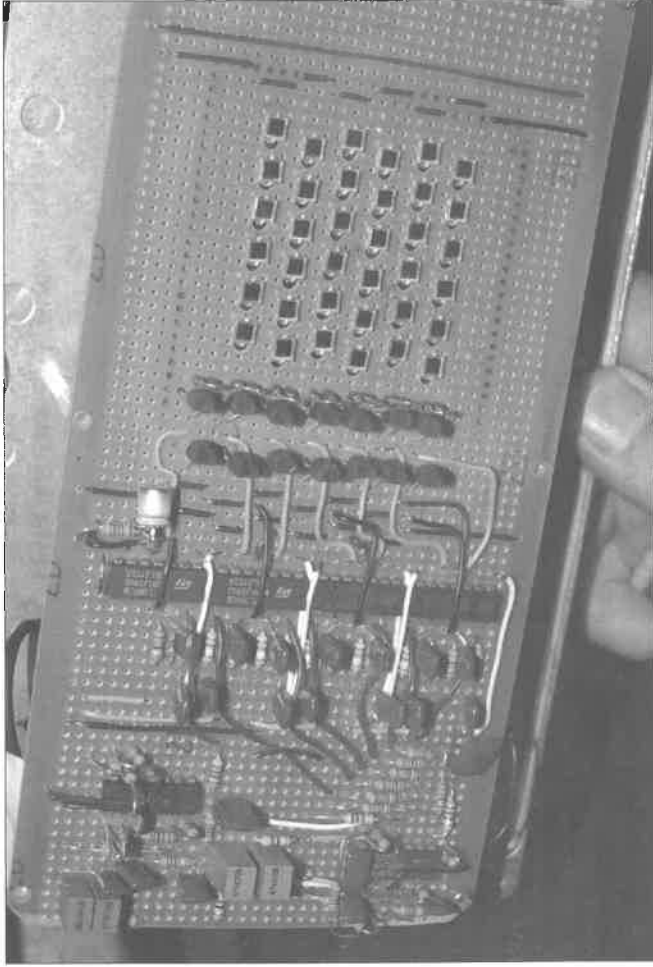


Figure 1: 35 photo diode receiver based on KA7OEI circuit. The 36th photo diode is used as a reference

Extending the Distance

With the improved receiver performance we then looked at extending the distance to Ken VK7DY's home 27 km away. Ken's home is in a valley with hills up to 350 meters high in between. Signals were immediately present at up to -5 dB on the WSJT scale under good cloud conditions with weak signals via clear air scatter. Under good conditions voice communication was possible at around S2 using pulse width modulation of the 60 Luxeon transmitter. Ken then took the receiver portable and over a few nights extended the distance to 66 km on JT65a at a signal level of -10 dB on the WSJT scale. While we still had 18dB to spare with JT65a we needed to understand more about propagation conditions favourable for long distance before wasting too much time out on dark nights.

Understanding the Weather Conditions

We thought that:

- Signals should improve with increasing cloud cover.
- Signals might be absorbed when the humidity was high.
- Signals should improve when the cloud height increases allowing more energy to pass through the window between the surface of the earth and the clouds.

Fortunately weather data is available from our local airport (Hobart) around 7 km from the centre of the path. This is available from the University of Wyoming USA web site⁸. Data on signal level from a single LED was collected over a 2 month period using Spectrum Lab in 1 mHz bandwidth and is compared with weather parameters below:

⁸ <http://weather.uwyo.edu>

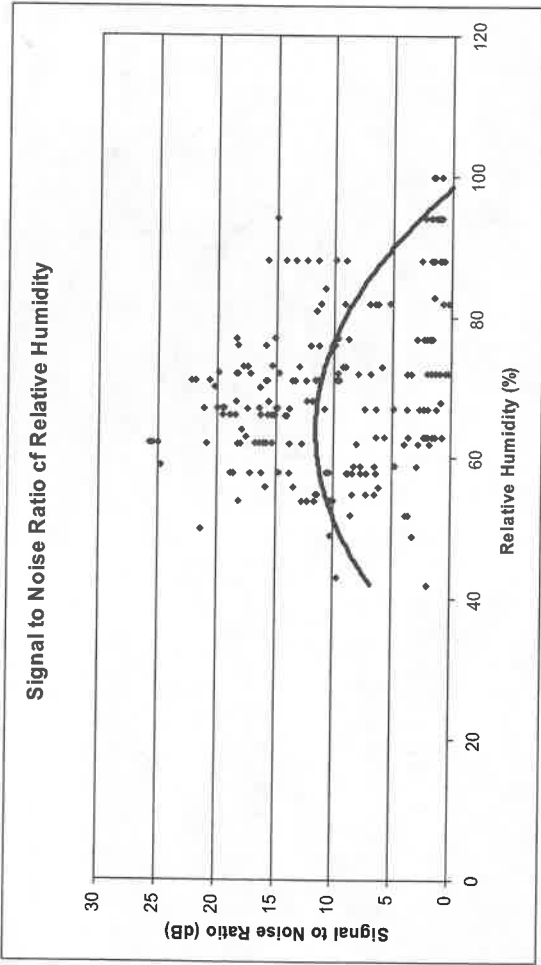


Figure 2:
Variation of Signal to Noise Ratio with relative humidity on a 27 km path, VK7MO to VK7DY

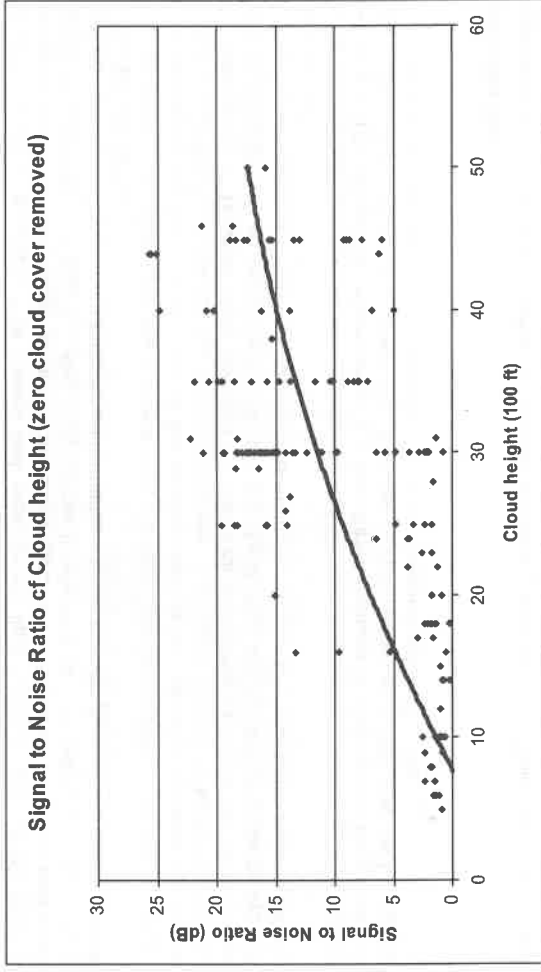


Figure 4:
Variation of Signal to Noise Ratio with cloud height on a 27 km path, VK7MO to VK7DY

To our surprise best signal levels occurred with around 50% cloud cover and relative humidity around 70%. But at least signals did improve as the cloud height increased. We think the explanation for the humidity results is that it is a secondary effect from the fact that low relative humidity often occurs when there are no clouds and thus nothing (or just clear air with particulate matter) to scatter off, and high relative humidity is often related to low clouds which prevent the signals passing over the hills. In the case of cloud cover there is a similar effect in that 100% cloud cover often occurs when the clouds are low and cut off the signals from passing over the hills. As shown in Figure 3 the key variable is cloud height and the higher the better as this allows more energy to pass through the gap between the intervening hills and the clouds.

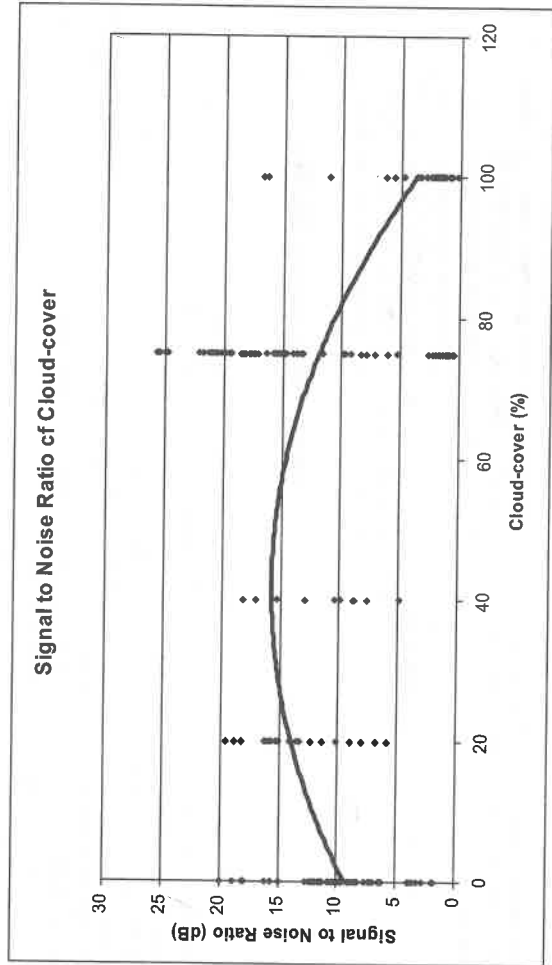


Figure 3:
Variation of Signal to Noise Ratio with cloud cover on a 27 km path, VK7MO to VK7DY

Red or Blue Light

As light passes through air it is scattered in other directions than desired and thus lost. Blue light scatters more readily than red and this is why the sky looks blue. As a rule of thumb in clear air red light is lost at about 0.1 dB/km and blue light at around 0.2 dB/km. Applying the "Something for Nothing" law means the signal to noise ratio at the receiver drops by 0.2 dB/km for red light and 0.4 dB/km for blue. Thus for every km the blue signal to noise ratio will be around 0.2 dB worse than red costing around 20 dB on a 100 km path. Our tests at 118 km with small four LED red and blue transmitters showed the red to be around 20 dB above the noise while the blue was hardly detectable thus confirming losses of this order. Thus for long distances red light is to be preferred.

External Noise

When one looks at the light on the clouds, from even a small city like Hobart, (population 206,000) one wonders how it is possible that LEDs can ever compete. The reason that they can compete is that fortunately the city lights are not modulated at the audio frequencies we are using. They do however produce broadband noise (called shot noise) due to the fact that at light frequencies even a steady light level is actually made up of separate photons and comes in

random bursts or quantum. This means that even steady light (such as from a DC source) produces white noise sidebands all across the audio spectrum. Fortunately these are well down on the fundamental and then by using very narrow bandwidths we can reduce the noise even further. Still as we improve our receiver performance we come to the point where external noise is the limiting factor.

An interesting feature of shot noise is that it does not increase in the way that you would expect. For example if you increase the area of the receiver lens by two you pick up twice the optical signal power but this translates into four times the electrical signal power due to the "Something for Nothing" Law. However while you also receive twice the optical noise the shot noise power only doubles rather than increasing by four like the signal. This feature of shot noise means that increasing the aperture of the receiver provides an improved signal to noise ratio in proportion to aperture area.

Most city lights are run from AC (in our case 50 Hz) and thus there are significant noise spikes at 50 Hz and 100 Hz and other harmonics. It is therefore necessary to filter out low frequencies in the receiver before they are amplified and generate further harmonics. Fortunately the harmonics are well down by the time one reaches the JT65a tone frequencies at 1270 Hz.

Internal Noise

Our present 35 photo diode system is internally limited by pre-amp noise. While our receiver field of view is relatively large (around 5 degrees beamwidth) much of it is wasted due to the space between the photo-diodes. One option would be to pack more photo-diodes into the same space. Potentially we might be able to get a 3 to 6 dB improvement this way. Other detectors such as Photo Multiplier Tubes and Avalanche Photo diodes have gain that can help overcome pre-amp noise. These will be discussed below.

It is useful to do a dark test to see how close we are to the external noise limit. We measure the noise level looking at the clouds and then cover the lens and note the difference. In the case of our 35 photo diode receiver that reduction is rarely more than one dB so we are still have a way to go to be beyond the limit of internal noise.

Avalanche Photo Diodes

Avalanche Photo Diodes (APDs) have good quantum efficiency (around 80%) and useful gain (around 50) but they are expensive, \$US 600 for medium sizes like 5 mm diameter and \$US 1200 for a 10mm square unit. Even at 10 mm the beamwidth with a typical large Fresnel lens is only 1.6 degrees and thus much of the available light is not picked up. In addition the performance tends to be limited by the internal noise of the APD on dark nights. Our tests at 27 km suggest that on red light the 5 mm APD gives about 10 dB improvement in system performance over the 35 photo-diode array and the 10 mm square unit a further 7 dB. The 10 mm square APD receiver (fig 5) has produced WSJT signal levels of -9 dB on a 118 km path.

Photo Multiplier Tubes

Photo-multiplier Tubes (PMTs) are available with larger photocathode areas (typically 20 to 40 mm diameter) and thus more useful fields of view. They also have very high internal gain (a million or more) to overcome pre-amp noise and have very low internal noise. The downside of PMTs is that they have relatively low quantum efficiency particularly at the red end of the spectrum dependent on the photocathode composition. While they are very expensive new they do become available on eBay at reasonable prices. Because of their poor quantum efficiency at the red end of the spectrum PMTs may not be competitive with APDs at longer distances where red is to be preferred. Nevertheless the very high gains and low internal noise of the PMT do offer the potential for using optical filters to reduce external noise and their large areas can maintain good fields of view. Thus further investigation is planned.



Figure 5: Left: 10 mm square APD Receiver with 395 x 395 mm Fresnel lens. Right: rear view showing focus adjustment arrangement with turnbuckle and wooden optical bench with rifle scope fitted for alignment. An adjustable black plastic loudspeaker enclosure port allows movement for focus adjustment while preventing the entry of extraneous light.

Examples of Performance

Transmitter	Receiver	Distance	S/N
1 x LED torch lens	35 photo-diode	27 km	-23 dB WSJT scale
1 x LED Fresnel lens*	1 photo-diode	27 km	-20 dB WSJT scale
1 x LED Fresnel lens*	35 photo-diode	27 km	-9 dB WSJT scale
60 x LED torch lenses	35 photo-diode	66 km	-10 dB WSJT scale
60 x LED torch lenses	10 mm APD	118 km	-9 dB WSJT scale
60 x LED torch lenses	10 mm APD	118 km	40 dB (20 mHz BW)
4 x Red LED torch lenses	10 mm APD	118 km	20 dB (2 mHz BW)
4 x Blue LED torch lenses	10 mm APD	118 km	0 to 5 dB (2 mHz BW)

* Small reading type 340 mm focal length Fresnel Lens in front of 20 mm torch lens giving about 3.5 degrees beamwidth

Signal Reliability and Variation

Signals are surprisingly reliable over our 27 km test path due to the averaging effect of even minimal cloud cover. There were probably less than 5% of nights that we had no signal at all and this was related to low cloud or fog preventing the signals getting over the intervening hills or loss due to heavy rain or in one case heavy bushfire smoke.

The graph at figure 6 shows the typical variation of signal levels over a week on our 27 km test path. The signals rise out of the noise only at night but they are then usually well above the noise using 1 mHz bandwidth and a single LED focussed by 20 mm torch lens with the 10 mm APD receiver.

Aircraft Safety

Australian regulations limit the impact of bright lights on aircraft operations and in particular the targeting of aircraft with lasers. While the intensities of our wide beamwidth LEDs do not approach those of lasers it is still possible to exceed safety limits when operating near an airport. The Australian Civil Aviation Safety Authority has set down various levels (below) that should not be exceeded and they may give notice that a bright light must be turned off or penalties apply.

Typical Signal Variations over a Week

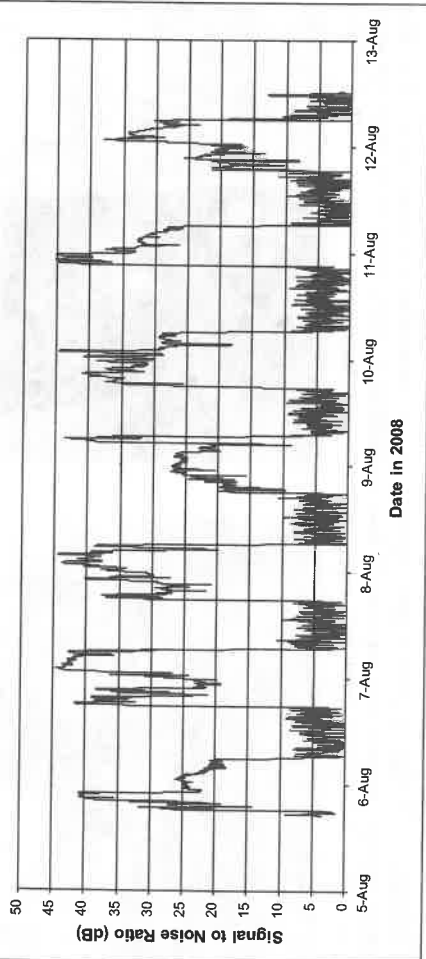


Figure 6: Typical Signal Variation over a week on 27 km test path

1. Runway approach 50 nanowatts/sq cm
2. 18.5 km from airport: 5 microwatts/sq cm
3. Beyond 18.5 km: 100 microwatts/sq cm

Our present operations are just within 18.5 km and thus the level 2 limit applies. This means that with our 60 LED array we should avoid its use if an aircraft is within 150 metres. While it is unlikely that an aircraft would ever come anywhere close to this limit we do monitor aircraft operations and turn off the 60 LED array whenever aircraft are in the beam. The single LED which we use for propagation tests is so low in power that it is safe to run it all night in unattended operation.

Safety Measures & Cautionary Notes

There is caution required with a range of the equipment utilised in this experimentation. Fresnel lenses should be covered when not in use especially before the sun rises in the morning! These lenses have the potential to focus the sun's energy to a point of around 1mm and can easily start a fire in the wooden box surrounding the instrumentation. The focused energy can also damage the diodes and tubes used within the receivers and transmitters. A general principle is to fully cover up the lenses when they not in use even when stored.

PMTs and APDs require high voltages of up to kilovolts. Therefore, suitable insulation and connectors need to be employed to prevent a shock hazard especially given these devices are used in dark locations.

PMTs have gain in the order of millions and it is very easy to desensitise and even permanently damage a tube by exposure to too much light. Too much light causes excessive electron production within the tube and has the potential to strip the chemical coating off the last few dynodes within the PMT. Photo-cathodes should always be covered when not in use as the generation of photoelectrons continues to take place even when no voltage is applied to the tube and excessive charge build up results in a noisy tube. This can be remedied by applying voltage and leaving the tube in the dark for a day or two. The general principle is cover the tube up when not in use and in storage.

As outlined in the Aircraft Safety section above there is constant vigilance required when shining any form of light into the air. Know your beam intensity levels, beam-widths and geographic

location and how these relate to the aircraft safety limits. When there is a remote chance of any aircraft passing through or near your beam, turn it off.

When using wide beam width transmitters shielding may need to be used to reduce any light from being radiated in unintended directions. This is particularly relevant in the suburbs where neighbourly relations between radio amateurs and the community are important.

Acknowledgments

We acknowledge the help of Paul Edwards VK7ZAS, Mike Groth VK7MJ, Clint Turner KA7OEI, Yves F1AVY and Chris Long VK3AML who have all been generous with advice and assistance and in the case of Mike Groth with test equipment and transceivers also.

Conclusions

- 118 km has been demonstrated on JT65a with 18 dB to spare
- 27 km propagation tests are routinely conducted with a single LED
- The use of Luxeon LEDs, relatively wide beamwidths, low noise receivers and narrow bandwidth digital modes is the key to this success



Fig.: VK7MO and his TX with 60 LEDs (see also cover Page for full color picture)

Note: Part 2 of this article will follow in next issue 1/2009.

Überhorizont-Kommunikation im optischen Bereich

Teil 1: Überblick und praktische Ergebnisse

von Rex Moncur, VK7MO, Justin Giles-Clark, VK7TW, Ken Sulman, VK7DY

Entfernungen von bis zu 118km wurden in der digitalen Betriebsart JT65A mittels Wolkenscatter-Ausbreitung auf der Frequenz 478 THz (rotes Licht) überbrückt. Verwendet wurde dabei eine Reihe von LEDs, deren Licht mittels kleinen Plastiklinsen, wie sie in Taschenlampen verwendet werden, fokussiert wird sowie ein Empfänger mit Avalanche Photodiode (APD) auf einer großen Fläche. Umfangreiche Ausbreitungsexperimente wurden über eine Entfernung von 27km unter Verwendung einer einzelnen LED mit mHz-Bandbreiten durchgeführt. Der Erfolg dieser Arbeit liegt in der Verwendung relativ großer Beamweiten (bis zu 10 Grad), um die Schwierigkeit, die Wolken genau zu treffen, zu umgehen, der Verwendung neuer Luxeon® LEDs höherer Leistung, großer (395 x 395 mm) Fresnel-Linsen aus Plastik, um soviel Licht wie möglich einzufangen, kombiniert mit schmalbandigen Digitalmoden und rauscharmen Empfängern. Unsere gesamte Arbeit hat nachts stattgefunden, da unsere Empfänger schon in der Dämmerung übersteuert werden. Für alle, die die Theorie weiter verfolgen oder ein eigenes System konstruieren möchten, wird dieser Artikel in den folgenden DUBUS-Ausgaben wie folgt fortgesetzt:

Teil 2, Theorie: deckt die Theorie von optischer Überhorizont-Kommunikation mittels Wolken ab, sowie die Theorie der Leistungseigenschaften von Sender und Empfänger. Die Theorie wird dann in Beziehung zu unseren Resultaten aus der Praxis gesetzt.

Teil 3 Sender: diskutiert die Optionen und liefert ausreichend Details für die Konstruktion einiger brauchbarer Optionen.

Teil 4 Empfänger: diskutiert die Optionen und liefert ausreichend Details für die Konstruktion einiger brauchbarer Optionen.

Hintergrund

Mike Groth, VK7MJ, und Chris Long, VK3AML⁹, haben als Pioniere für die quasi-optische Kommunikation Luxeon-LED-Sender und rauscharme Empfänger mit Fresnel-Linsen verwendet. Am 19. Februar 2005 haben Mike und Chris eine Distanz von 167 km zwischen zwei Bergen in Tasmanien, Australien, überbrückt. Diese Technik wurde mit einem rauschärmeren Empfänger¹¹ von Clint Turner, KA7OEI, weitergeführt, der am 3. Oktober 2007 über 278km einen Entfernungsrekord über eine quasi-optische Strecke zwischen zwei hohen Bergen in Utah, USA, aufstellte. Ende 2006 haben wir angefangen, Optionen für nicht-quasi-optische Ausbreitung zu untersuchen und auch das Computerprogramm WSJT¹² von Joe Taylor, K1JT, als Mittel eingebaut, um die so viel schwächeren Signale aus dem Rauschen zu holen. Für unsere Ausbreitungs-Experimente mit mHz-(Millihertz)-Bandbreite haben wir das Audio-

⁹ Luxeon ist der Handelsname für eine LED mit verbesserter optischer Ausgangsleistung, die von der Firma Philips Lumileds Lighting hergestellt wird. <http://www.luxeon.com/>

¹⁰ Informationen über die Arbeit von VK7MJ und VK3AML findet man im Web unter: http://modulatedlight.org/Modulated_Light_DX/MODULATED_LIGHT_DX.html

¹¹ Ein exzellenter Artikel über die Entwicklung rauscharmer Empfänger von KA7OEI findet man unter: http://modulatedlight.org/optical_comm/optical_rx1.html

¹² K1JT's WSJT Programm findet man unter: <http://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/>

Analyse-Programm Spectrum Lab¹³ von Wolfgang Buescher, DL4YHF, verwendet, das eine automatische Erfassung von Daten wie Signal- und Rausch-Pegel und Frequenz ermöglicht.

Linien

Linien sind das Analogon für Antennen in der optischen Welt. Mit kleinen Linsen aus Plastik, wie sie in Taschenlampen verwendet werden, kann man optische Gewinne von etwa 24 dBi mit Öffnungswinkeln von etwa 10 Grad erreichen. Viel höhere Gewinne kann man mit Fresnel-Linsen aus Plastik erreichen, z.B. wie sie in Lesehilfen verwendet werden oder die größeren aus Overhead-Projektoren. Große 395 x 395 mm Fresnel-Linsen aus Plastik haben optische Gewinne von etwa 50 dBi, wobei der Öffnungswinkel aber bis auf weniger als 1 Grad abfällt, je nach Größe des Detektors.

Wolkenscatter

Bei unseren ersten Experimenten haben wir VK7MJ's Transceiver mit schmalen Öffnungswinkeln (weniger als 1 Grad) verwendet. Diese Versuche wurden über eine Strecke von 1.2 km durchgeführt, wobei keine Sichtverbindung zwischen den Standorten von VK7MO und VK7TW herrschte. Wir fanden schnell heraus, dass es unmöglich ist, einen Empfänger und Sender mit jeweils kleinem Öffnungswinkel auf den selben Punkt einer Wolke auszurichten. Um das Problem der Ausrichtung abzumildern, ist es nötig, den Öffnungswinkel des Senders zu vergrößern. Aber das bedeutet verringerten optischen Gewinn und geringere Systemleistung.

Die geringere Leistung kann durch Verwendung von digitalen Moden für schwache Signale und durch mehr Lichtleistung ausgeglichen werden. Während wir mit Hochleistungslampen aus Projektoren und mechanischer Modulation, Quecksilberdampflampen und verschiedenen Typen von LEDs experimentierten, gelang der große Durchbruch durch die Verwendung von Luxeon II LEDs mit kleinen Taschenlampenlinsen aus Plastik (10 Grad Öffnungswinkel) und die Erhöhung der Leistung durch ihr Zusammenschalten in Bänken.

Interessanterweise wird das Ausrichten auf die Wolken bei größeren Entfernungen einfacher. Dies liegt darin begründet, dass bei kürzeren Distanzen von wenigen km der Elevationswinkel zu den Wolken sehr unterschiedlich sein kann, bis zu 60 Grad oder mehr. Bei weiten Entfernungen, wie etwa 50km, begrenzt die Höhe der Wolke die möglichen Elevationswinkel auf 1 oder 2 Grad und ein enger vertikaler Öffnungswinkel kann den ganzen Bereich möglicher Elevationen abdecken, indem man einfach gerade über den Horizont ausrichtet.

Die Probleme der Ausrichtung außer Betracht gelassen, ist es am besten einen so kleinen Öffnungswinkel wie möglich zu verwenden, um den optischen Gewinn zu erhöhen und damit die Systemleistung. Wenn man beides, Ausrichtung und Systemleistung, zusammen betrachtet, sind wir der Ansicht, dass der optimale Öffnungswinkel des Senders etwa 10 Grad für Entfernungen bis 20km, 5 Grad für 20 bis 60km und 1 oder 2 Grad für über 60km ist. Über 60km wird der horizontale Öffnungswinkel zum limitierenden Faktor, weil es schwierig wird, zwei Systeme auf deutlich besser als 1 Grad auszurichten, wenn es keinen entfernten Punkt gibt, auf den man zielen kann. Auf der Empfängerseite wird die beste Leistung im allgemeinen dadurch erzielt, dass der Öffnungswinkel des Empfängers zu dem des Senders passt.

Eine zweite nützliche Sache bei weiteren Entfernungen ist, dass die Wolken dazu tendieren das Signal so auszumitteln, dass sogar mit einer minimalen Wolkendecke die Signale recht beständig in der Signalstärke sind. Bei kürzeren Entfernungen hingegen verschwindet das Signal oft ganz aufgrund der Lücken zwischen den Wolken.

Luxeon LED Sender

Wir verwenden den LED-Typ Lumiled Luxeon LXHL-LD3C, der maximale Lichtausgangsleistung bei 627 nm bzw. rotem Licht liefert. Dieses Model kommt mit einem kleinen Alu-Wärmeableiter, der Luxeon Star heisst, und es liefert etwa ein halbes Watt durchschnittliche Lichtausgangsleistung. Einige Firmen fertigen kleine Plastiklinsen und Halter passend für Luxeon LEDs. Wir verwenden die L2OP005 Linse und den L2OHS35 Halter von L2 Optics¹⁴. Diese Linsen haben 20mm Durchmesser und etwa 85% Effektivität bei 10 Grad Öffnungswinkel bzw. 24 dBi optischem Gewinn. Wegen ihrer kleinen Größe und ihrem relativ niedrigen Preis ist es recht praktikabel, eine Anordnung von 60 Luxeon Dioden auszubauen, um die Leistung zu erhöhen. Siehe Titelbild. Wie oben erwähnt, ist es

¹³ DL4YHF's Spectrum Lab Program is available at: <http://freenet-homepage.de/dl4yhf/spectra1.html>

¹⁴ <http://www.l2optics.com/>

besser, kleinere Öffnungswinkel für größere Entfernungen zu verwenden. Dabei entsteht das Problem, dass größere Linsen zur Verkleinerung des Öffnungswinkels benötigt werden, und dann wird bei einer großen Stückzahl die Gesamtgröße der Anordnung ein Thema. Für die roten Luxeons wird ein maximaler Spitzenstrom von 2,2 A angegeben, sie haben einen Spannungsabfall von etwa 3,1 V und eine optische Effektivität von etwa 16%. Es wird eine Rechteckmodulation mittels Hochstrom-MOSFETs (IRF 1405) vorgenommen. Es ist viel einfacher hohe Ströme mit FET-Schaltern für Rechteckmodulation zu erzeugen, als einen linearen Modulator zu bauen. Der einzig zu beachtende Punkt bei diesem Ansatz ist, dass durch die Verwendung von Rechtecksignalen Audio-Harmonische erzeugt werden, was aber kein Problem bei JT65A ist, da die Harmonischen des tiefsten Tones ausreichend hoch über dem höchsten Grundton liegen. Da JT65A Sinuswellen am Ausgang liefert, ist es notwendig, diese in Rechteckwellen umzuwandeln, um die MOSFETs steuern zu können.

Etwas für umsonst

Beim Testen der Anordnung der 60 Luxeons haben wir die Leistung mit einer Bank von 30 Stück alleine mit der von 60 Stück, also einer Leistungsverdoppelung, verglichen. Wir waren überrascht zu beobachten, dass die Verdoppelung der Leistung das Signal-Rausch-Verhältnis um 6 dB verbesserte. Mit dem HF-Hintergrund erschien es uns, als ob wir etwas umsonst dazu bekämen und wir nannten es das „Etwas-umsonst-Gesetz“. Aber es gibt einen guten Grund dafür: Immer wenn man die Leistung des Senders verdoppelt, verdoppelt man die Zahl der Photonen am Detektor. Am Detektor setzt jedes Photon (100% Effektivität vorausgesetzt) ein Elektron frei. Die Elektronen erzeugen einen proportionalen Strom im Lastwiderstand der Photodiode. Also, wenn man die Sendeleistung verdoppelt, verdoppelt man auch die Spannung über dem Lastwiderstand. Mit $P = V^2/R$ erhält man die vierfache Signalleistung oder 6dB Verbesserung im Signal-Rausch-Verhältnis. Entsprechend vergrößert unsere Anordnung mit 60 LEDs das Signal-Rausch-Verhältnis um $20 \cdot \text{LOG}_{10}(60)$ oder 35 dB gegenüber einer einzelnen LED. Die Kehrwerte ist aber, dass, wenn man die empfangenen Photonen am Detektor um die Hälfte verringert, sagen wir dadurch, dass wir über eine längere Entfernung arbeiten wollen, dann das Signal-Rausch-Verhältnis um 6 dB schlechter wird. Unglücklicherweise ist es im allgemeinen der Fall, dass wir als Funkamateure versuchen mit immer schwächeren Signalen etwas arbeiten zu wollen und deshalb das „Etwas-umsonst-Gesetz“ für uns sozusagen genau umgekehrt arbeitet.

Verbesserung der Empfängerleistung

Wenn man Photodioden verwendet, wird die Empfängerleistung generell durch den Vorverstärker begrenzt. Clint Turners, KATOEI, Webseite¹⁵ gibt einen hervorragenden Überblick über die Entwicklung beim Design der Vorverstärker, was zu seinem bedeutend verbesserten Empfänger führt. Der kritische Punkt ist, dass die Leistung eines Vorverstärkers beim Signal-Rauschverhältnis primär eine Funktion des Lastwiderstands über der Photodiode ist. Je höher der Widerstand, desto besser. Das liegt daran, dass der selbe Photodiodenstrom eine größere Spannung erzeugt nach $V = IR$. Während wir Lastwiderstände von 10 bis hundert Ohm mit FETs erreichen können, ist bei Photodioden das Problem, dass bei solch hohen Werten des Lastwiderstands die geringe Kapazität (ein paar Picofarad) der Photodiode im benötigten Audioband ein Abrutschen der Frequenz verursacht. Clint's Lösung, (die in der Literatur für Glasfaser-Kommunikationstechnik sehr bekannt ist) besteht darin, das Signal durch einen OP-Amp-Differentiator zu führen, um den Frequenzgang wiederherzustellen. Wir haben einen von Clints Vorverstärkern gebaut und waren erfreut, eine Verbesserung von etwa 14 dB zu erreichen.

Dann haben wir geschaut, ob wir weitere Verbesserungen erreichen könnten durch Verwendung von vielen Photodioden hinter derselben Fresnel-Linse mit separaten KATOEI-Vorverstärkern und Aufsummieren der Ausgänge. Unser Gedanke war, dass wir den Strom mit jeder Verdoppelung der Photodioden (6 dB Leistungserhöhung) verdoppeln könnten, aber, da das Rauschen, das mit separaten Vorverstärkern erzeugt wird, nicht kohärent ist, sollten es nur 3 dB Zuwachs sein. Folglich sollte mit multiplen (N) Photodioden die Verbesserung $10 \cdot \text{LOG}_{10}(N)$ sein. Für 35 Photodioden sollte dies 15,4 dB sein. In der Praxis haben wir für 35 Photodioden 14 dB Verbesserung erhalten (Abb. 1).

Abb. 1: Empfänger mit 35 Photodioden, basierend auf der Schaltung von KATOEI. Die 36. Photodiode dient als Referenz.

Erhöhung der Entfernung

Mit der verbesserten Empfängerleistung haben wir dann daran gedacht, die Distanz bis zum QTH von Ken, VK7DY, 27km entfernt auszudehnen. Kents Haus liegt in einem Tal mit Hügeln dazwischen, die bis zu 350m hoch sind. Die Signale waren sofort da, mit bis zu -5dB auf der WSJT-Skala bei guten Wolkenbedingungen, schwache Signale gab es bei Klarluft-Scatter. Bei guten Bedingungen war Sprachübertragung möglich bei etwa S2 unter Verwendung von Pulsmodulation des Luxeon-60-Senders. Ken hat dann den Empfänger portabel aufgebaut und während einiger Nächte die Distanz bis 66km ausgedehnt. In JT65A lag der Signalpegel dann bei -10 dB auf der WSJT-Skala. Mit immer noch 18 dB Reserve bei JT65A wollten wir nun trotzdem erstmal mehr über die Ausbreitungsbedingungen verstehen lernen, die für noch weitere Entfernungen günstig sind, bevor wir zu viel Zeit in dunklen Nächten verschwenden würden.

Verstehen der Wetterbedingungen

Wir dachten, dass

- Signale mit wachsender Wolkenbedeckung stärker werden,
- Signale eventuell absorbiert werden, wenn die Feuchtigkeit hoch ist,
- Signals besser werden, wenn die Wolkenhöhe ansteigt, weil dann mehr Energie durch das Fenster zwischen Erdoberfläche und Wolken gelangen kann.

Zum Glück sind von unserem örtlichen Flughafen (Hobart), der etwa 7 km vom Mittelpunkt des Ausbreitungspfad es entfernt ist, Wetterdaten verfügbar. Diese gibt es auf der Webseite der Universität von Wyoming, USA¹⁶. Daten vom Signalpegel einer einzelnen LED wurden über einen Zeitraum von 2 Monaten mittels des Programms Spectrum Lab bei 1 mHz Bandbreite gesammelt und mit den unten angegebenen Wetterdaten verglichen.

Abb. 2: Variation des Signal-Rausch-Verhältnisses in Relation zur relativen Feuchte über einen 27-km-Pfad von VK7MO to VK7DY

Abb. 3: Variation des Signal-Rausch-Verhältnisses in Relation zum Bedeckungsgrad über einen 27-km-Pfad von VK7MO to VK7DY

Abb. 4: Variation des Signal-Rausch-Verhältnisses in Relation zur Wolkenhöhe über einen 27-km-Pfad von VK7MO to VK7DY

Zu unserer Überraschung traten die besten Signalpegel bei etwa 50% Bedeckungsgrad und bei ungefähr 70% relativer Luftfeuchtigkeit auf. Wenigstens verbesserten sich die Signale mit steigender Wolkenhöhe. Wir glauben, dass die Ursache für Ergebnisse bei der Luftfeuchtigkeit durch einen sekundären Effekt erklärbar sind: Niedrige relative Feuchte tritt oft auf, wenn der Himmel wolkenlos ist. Folglich ist nichts vorhanden, woran gescattert werden kann (außer klarer Luft mit Feinstaub). Hohe relative Feuchte ist oft verbunden mit niedrigen Wolken, die verhindern, dass die Signale über die Hügel gelangen. Für den Fall des Bedeckungsgrads gibt es einen ähnlichen Effekt bei 100% Bedeckungsgrad, weil der oft auftritt, wenn die Wolken niedrig sind und diese die Signale von der Übertragung über die Hügel abschneiden. Wie in Abb. 3 gezeigt ist die Schlüsselvariable die Wolkenhöhe. Je höher sie ist, desto besser, weil dies ermöglicht, dass mehr Energie durch die Lücke zwischen den dazwischenliegenden Hügeln und den Wolken übertragen werden kann.

Rotes oder blaues Licht

Wenn Licht durch Luft tritt, wird es in andere Richtungen gestreut als in die erwünschte und damit verloren. Blaues Licht wird leichter gestreut als rotes. Das ist der Grund, weshalb der Himmel blau aussieht. Als Faustregel gilt, dass in klarer Luft rotes Licht um etwa 0,1 dB/km gedämpft wird und blaues Licht etwa 0,2dB/km. Die Anwendung des „Etwas-umsonst-Gesetzes“ bedeutet hier dann, dass das Signal-Rauschverhältnis am Empfänger bei rotem Licht um 0,2 dB/km abfällt und bei blauem Licht um 0,4 dB/km. Folglich ist für jeden km das Signal-Rauschverhältnis bei blauem Licht um 0,2 dB schlechter als bei rotem, was etwa 20 dB bei einer Distanz von 100km sind. Unsere Versuche mit kleinen roten und blauen LED-Sendern aus jeweils 4 Stück LEDs zeigten, dass das rote Signal etwa 20 dB über dem Rauschen lag, während das blaue Signal kaum detektierbar war. Damit wurde also die o.a. Größenordnung der Verluste bestätigt. Für lange Distanzen ist also rotes Licht vorzuziehen.

¹⁵ http://modulatedlight.org/optical_comms/optical_rx1.html

¹⁶ <http://weather.uwyo.edu>

Externes Rauschen

Wenn man das Licht an den Wolken betrachtet, sogar bei einer kleinen Stadt wie Hobart (260.000 Einwohner), fragt man sich, wie es möglich ist, dass LEDs da überhaupt mithalten können. Der Grund dafür ist, dass die Lichter der Stadt zum Glück nicht im Audiobereich, den wir benutzen, moduliert sind. Aber sie produzieren Breitbandrauschen (auch Schrotrauschen genannt) aufgrund der Tatsache, dass bei Lichtfrequenzen eine stetige Menge an Licht aus einzelnen Photonen besteht und als zufälliger Burst oder Quantum erscheint. Das bedeutet, dass sogar konstantes Licht (so wie aus einer DC-Quelle) Seitenbänder mit weißem Rauschen über das gesamte Audiospektrum erzeugt. Zum Glück liegen diese ausreichend unterhalb der Grundwelle und mittels sehr kleiner Bandbreiten können wir das Rauschen dann noch weiter reduzieren. Dennoch, wenn wir unsere Empfängerleistung weiter verbessern, kommen wir an den Punkt, wo das externe Rauschen der limitierende Faktor wird.

Eine interessante Eigenschaft des Schrotrauschens ist, dass es nicht in der Weise ansteigt, wie man es erwarten würde. Wenn man z.B. die Fläche der Empfängerlinse verdoppelt, nimmt man die doppelte optische Signalleistung auf, die sich in die vierfache elektrische Signalleistung umsetzt, aufgrund des „Etwas-umsonst-Gesetzes“. Aber obwohl man auch das doppelte optische Rauschen empfängt, verdoppelt sich das Schrotrauschen nur und vervierfacht sich nicht wie das Nutzsignal. Diese Eigenschaft des Schrotrauschens bedeutet, dass das Vergrößern der Öffnung des Empfängers ein zur Fläche der Öffnung proportional verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis liefert.

Die meisten Lichtquellen einer Stadt werden von Wechselstrom gespeist (in unserem Fall 50 Hz) und folglich gibt es signifikante Rauschspitzen bei 50 Hz, 100 Hz und weiteren Harmonischen. Deshalb ist es notwendig, niedrige Frequenzen im Empfänger herauszufiltern, bevor sie verstärkt werden und weitere Harmonische generieren. Zum Glück sind die Harmonischen gut unterdrückt, bevor sie die Tonfrequenzen von JT65A bei 1270 Hz erreichen.

Internes Rauschen

Unser gegenwärtiges RX-System aus 35 Photodioden wird intern durch das Vorverstärker-Rauschen begrenzt. Indem unsere sichtbare Empfangsfläche relativ groß ist (etwa 5 Grad Öffnungswinkel), wird viel davon durch den Platz zwischen den Photodioden verschwendet. Eine Möglichkeit wäre, mehr Photodioden auf dem selben Platz unterzubringen. Potenziell könnten wir so 3 bis 6 dB Verbesserung erhalten. Andere Detektoren wie Photo-Multiplier-Röhren und Avalanche-Photodioden weisen Verstärkung auf, die helfen kann, das Vorverstärker-Rauschen zu überwinden. Das wird weiter unten diskutiert.

Es ist sinnvoll einen Dunkel-Test durchzuführen, um festzustellen wie nahe wir an der externen Rauschbegrenzung liegen. Wir messen den Rauschpegel auf die Wolken zielend und bedecken dann die Linse und notieren den Unterschied. Für unseren Empfänger mit 35 Photodioden war die Absenkung selten mehr als 1 dB. So haben wir immer noch einen Weg vor uns, um über der Grenze des internen Rauschens zu liegen.

Avalanche Photodioden

Avalanche Photo Dioden (APD) haben eine gute Quanten-Effektivität (etwa 80%) und brauchbare Verstärkung (etwa 50), sind aber teuer mit 600 USD für mittlere Größen wie 5mm Durchmesser und 1200 USD für 10-qmm-Typen. Selbst bei 10 qmm ist der Öffnungswinkel mit einer typischen großen Fresnel-Linse nur 1,6 Grad, so dass viel des zur Verfügung stehenden Lichts nicht aufgenommen wird. Außerdem scheint die Leistung durch das interne Rauschen der APD bei dunklen Nächten begrenzt zu werden. Unsere Tests bei 27km ergaben, dass bei rotem Licht die 5mm-APD etwa 10 dB Verbesserung der Systemleistung ergibt verglichen mit dem 35-Photodioden-Empfänger. Eine 10-qmm-APD bringt nochmals 7 dB. Der 10-qmm-APD-Empfänger (Abb. 5) hat über 118km Entfernung WSJT-Signalpegel von -9 dB erzeugt.

Photo-Multiplier-Röhren

Photo-Multiplier-Röhren (PMT) sind mit größeren Photokathodenflächen (typisch 20 bis 40mm Durchmesser), und damit brauchbarerem Sichtfeld, verfügbar. Sie weisen auch sehr hohe interne Verstärkung (eine Million oder mehr) auf, um das Vorverstärker-Rauschen zu beseitigen, und sie haben sehr niedriges internes Rauschen. Der Nachteil der PMTs ist, dass sie relativ niedrige Quanten-Effektivität haben, besonders am roten Ende des Spektrums, je nach Aufbau der Photokathode. Neu sind sie sehr teuer, bei eBay gibt es sie aber zu annehmbaren Preisen. Wegen ihrer schlechten Quanten-Effektivität am roten Ende des Spektrums könnten PMTs mit APDs bei längeren Entfernungen nicht konkurrenzfähig sein, wo rotes Licht zu bevorzugen ist. Dennoch, die sehr hohen Verstärkungen und das

niedrige interne Rauschen der PMT bieten die Möglichkeit, optische Filter zu verwenden, um das externe Rauschen zu reduzieren und ihre großen Flächen können gute Sichtfelder ermöglichen. Folglich sind hier weitere Untersuchungen geplant.

Abb. 5, links: 10 qmm APD Empfänger mit 395 x 395 mm Fresnel-Linse. Rechts: Rückansicht mit Anordnung für die Fokus-Justierung, Festspannvorrichtung, hölzerner Arbeitsfläche und Zielfernrohr. Eine einstellbare, schwarze Lautsprecherumrahmung aus Kunststoff ermöglicht die Justierung des Fokus, ohne dass von außen Licht eintreten kann.

Beispiele für Leistungsdaten

Sender	Empfänger	QRB	S/N
1 x LED Lampen-Linse	35 Photodioden	27 km	-23 dB WSJT-Skala
1 x LED Fresnel-Linse*	1 Photodiode	27 km	-20 dB WSJT-Skala
1 x LED Fresnel-Linse*	35 Photodioden	27 km	-9 dB WSJT-Skala
60 x LED Lampen-Linsen	35 Photodioden	66 km	-10 dB WSJT-Skala
60 x LED Lampen-Linsen	10 mm APD	118 km	-9 dB WSJT-Skala
60 x LED Lampen-Linsen	10 mm APD	118 km	40 dB (20 mHz Bandbreite)
4 x rote LED Lampen-Linsen	10 mm APD	118 km	20 dB (2 mHz Bandbreite)
4 x blaue LED Lampen-Linsen	10 mm APD	118 km	0 - 5dB (2 mHz Bandbreite)

* Kleine Ausführung einer Fresnellinse (Lesehilfe) mit 340mm Fokallänge vor 20-mm Taschenlampenlinsen, resultierend in etwa 3.5mm Öffnungswinkel

Beständigkeit und Variation der Signale

Die Signale sind überraschend beständig über unseren 27-km-Pfad aufgrund des mittelnden Effektes von auch nur einer minimalen Wolkendecke. Es gab wahrscheinlich weniger als 5% der Nächte, bei denen wir überhaupt kein Signal hatten. Dies lag an niedrigen Wolken oder Nebel, so dass die Signale nicht über die dazwischenliegenden Hügel gelangen konnten oder an Verlusten aufgrund starker Regenfälle oder in einem Fall an starker Rauchentwicklung durch einen Waldbrand.

Die Kurve in Abb. 6 zeigt die typische Schwankung des Signalpegels über unser 27-km-Teststrecke über den Zeitraum einer Woche. Die Signale kommen nur nachts aus dem Rauschen, sind dann aber deutlich über der Rauschgrenze. Verwendet wurde hier eine einzelne LED mit 20mm-Taschenlampenlinse, 10-qmm-APD-Empfänger und 1 mHz Bandbreite.

Abb. 6: Typische Schwankung des Signal über eine Woche über die 27km-Teststrecke

Sicherheit des Luftverkehrs

In Australien regeln Gesetze die Grenzen für den Einfluss von hellen Lichtquellen auf den Luftverkehr und speziell das Zielen auf Flugzeuge mit Lasern. Während die Intensitäten unserer LEDs mit größtem Öffnungswinkel nicht diejenigen von Lasern erreichen, ist es trotzdem möglich, dass die Grenzwerte überschritten werden, wenn man in der Nähe eines Flughafens ist. Die australische Luftsicherheitsbehörde hat verschiedene Grenzwerte festgelegt, siehe unten, die eingehalten werden müssen. Es kann angeordnet werden, dass helle Lichtquellen ausgeschaltet werden müssen, andernfalls drohen Strafen.

1. Landebahnbereich: 50 nW/qcm
2. 18.5 km von Flughafen: 5 Mikrowatt/qcm
3. über 18.5 km: 100 Mikrowatt/qcm

Unsere gegenwärtigen Versuche liegen gerade innerhalb der 18.5-km-Zone, so dass für uns Stufe 2 gilt. Das bedeutet, dass wir mit unserer Anordnung von 60 LEDs Betrieb vermeiden müssen, wenn sich innerhalb von 150m ein Flugzeug befindet. Obwohl es unwahrscheinlich ist, dass ein Flugzeug uns jemals so nahe kommt, beobachten wir

den Luftverkehr und schalten den Sender mit den 60 Dioden ab, wenn ein Flugzeug in der Strahlrichtung erscheint. Die einzelne LED, die wir für die Ausbreitungsversuche verwenden, hat so niedrige Leistung, dass es sicher genug ist, wenn wir sie die ganze Nacht unbemannt laufen lassen.

Sicherheitshinweise & Vorsichtsmaßnahmen

Sicherheitsmaßnahmen sind für Teile der Ausrüstung nötig, die hier für die Experimente verwendet werden. Fresnel-Linsen sollten abgedeckt sein, wenn sie nicht verwendet werden. Besonders bevor die Sonne morgens aufgeht! Diese Linsen haben das Potential das Sonnenlicht auf einen Punkt von 1mm Größe zu fokussieren und können so leicht das um die Elektronik befindliche Holzgehäuse in Brand setzen. Die fokussierte Energie kann auch die Dioden und Röhren von Sender und Empfänger beschädigen. Man sollte sich zur Regel machen, die Linsen immer abzudecken, wenn sie nicht in Benutzung sind, auch dann wenn sie nur gelagert werden.

PMTs und APDs benötigen Hochspannung von bis zu mehreren KV. Deshalb müssen passende Isolierung und Verbinder benutzt werden, um die Gefahr eines Stromschlags zu vermeiden, gerade wo diese Geräte ja im Dunklen benutzt werden.

PMTs haben Verstärkung in Größenordnungen von Millionen und es ist sehr leicht diese unempfindlich zu machen und sogar dauerhaft zu beschädigen, in dem man sie zu viel Licht aussetzt. Zu viel Licht verursacht eine exzessive Produktion von Elektronen in der Röhre und kann dadurch die chemische Beschichtung der letzten Dynoden in der Röhre ablösen. Photo-Kathoden sollten immer abgedeckt sein, wenn sie nicht in Betrieb sind, weil die Erzeugung von Photoelektronen weiter läuft, sogar wenn keine Spannung an der Röhre anliegt und starke Aufladungen verursachen eine rauschende Röhre. Das kann geheilt werden durch Anlegen von Spannung während die Röhre 1 oder 2 Tage im Dunklen liegt. Die generelle Regel sollte sein, die Röhre zu bedecken, wenn sie nicht verwendet bzw. gelagert wird.

Wie oben beim Punkt der Sicherheit für den Flugverkehr ausgeführt, ist dauernde Aufmerksamkeit nötig, wenn man welche Form von Licht auch immer in den Himmel abstrahlt. Man muss die Intensität und Öffnungswinkel seines Lichtstrahls und die geographischen Verhältnisse kennen und wissen, wie sich diese mit den Sicherheitsbestimmungen für den Luftverkehr vertragen. Sobald eine geringe Möglichkeit besteht, dass ein Flugzeug durch oder nahe an den Strahl kommt, sollte man abschalten.

Wenn man Sender mit weiten Öffnungswinkeln verwendet, sollte man eventuell Abschirmungen benutzen, um die Abstrahlung von Licht in unbeabsichtigte Richtungen zu reduzieren. Das ist gerade bedeutend an Orten, wo eine nachbarschaftliche Beziehung zwischen Funkamateuren und der Gemeinschaft wichtig ist.

Danksagung

Wir möchten uns bei Paul Edwards, VK7ZAS, Mike Groth, VK7MJ, Clint Turner, KATOEI, Yves Garnier, F1AVY und Chris Long, VK3AML, für die Hilfe bedanken. Alle haben großzügig Rat und Beistand gegeben, Mike Groth auch Testgeräte und Transceiver.

Fazit

- 118 km wurden in JT65A mit 18 dB Reserve demonstriert
- Ausbreitungsversuche über 27 km laufen routinemäßig mit einer einzelnen LED
- Die Verwendung von Luxeon LEDs, relativ weiten Öffnungswinkeln, rauscharmen Empfängern und schmalbandigen, digitalen Modes sind der Schlüssel für diesen Erfolg.

Hinweis: Teil 2 dieses Artikels folgt in der nächsten Ausgabe 1/2009.

1 to 3 GHz PLL Frequency Synthesizer

by Daniel Uppström, SM6VZF

Abstract

Described in this article is a frequency synthesizer that can form an LO for microwave transverters or beacon needs between 1 and 3 GHz. By using the latest PLL-chips and a high phase comparator frequency, a phase-noise floor at better than -100 dBc/Hz can be realized at 1152 MHz.

Background

Fundamental for all experimenting at UHF and microwave frequencies is the availability of a local oscillator (LO) solution. The common approach to generate an LO-signal for amateur radio microwave transverters and beacons has for many years been to rely on a crystal oscillator working at around 100 MHz, followed by a chain of multiplier stages. This approach requires no digital circuitry and has the possibility to give a very low phase-noise. On the other hand it requires an expensive quartz crystal, often custom made. Furthermore it occupies a lot of board space, mainly because of the many filters needed in the chain. If these filters are too small and not sleep enough there will always be some wrong order harmonics present in the output. In addition, the temperature stability of the crystal oscillator is often not good enough in itself, requiring heating and thermal insulation. Lately it has also become popular to lock the crystal oscillator to an external OCXO or GPS signal.

Instead of using multipliers one has the ability to lock a VCO running directly at the output frequency. This approach demands little board space and produces no sub harmonics or mixing products in the output. Furthermore, it has the advantage that the temperature stability is directly defined by the reference oscillator. The main drawback is that due to non-ideal frequency dividers and phase comparators it suffers in general more phase-noise than the solution with crystal oscillator and multipliers.

PLL theory

The output frequency of a PLL-synthesizer can be written as $F = N F_{comp}$, where N is the division ratio and F_{comp} is the phase comparator frequency. When locked, the PLL attenuates VCO-noise close to the carrier, below an offset frequency known as the loop bandwidth. The phase-noise within the loop bandwidth, can be approximated to

$$PN = P_0 + 20 \log N + 10 \log F_{comp}$$

where P_0 is the normalised phase-noise floor of the dividers and phase comparator (specified by some manufacturers of PLL chips). From this equation it can be seen that, for a given, fixed output frequency, it is better to have a lower division ratio than a low comparator frequency. Naturally there are practical limitations in how high the comparator frequency can be. Many PLL chips can't handle more than some MHz. Fortunately there is now a line of chips from Analog Devices with few limitations, that lets a common 10, 12, 12.8 or 14.4 MHz (or higher) TCXO/OCXO frequency be directly fed to the phase comparator. The ADF4106 has a specified P_0 of -219 dBc/Hz. Thus, if used with a 14.4 MHz reference and a division ratio of 80, to generate the 1152 MHz needed for 23 cm transverters, a phase-noise floor at -109 dBc/Hz should be theoretically possible. With a higher PFD-frequency the noise floor could even drop a few more dB. To make the best use of such a low PLL-noise, the loop bandwidth could be designed to be in the order of several hundred kHz when used with a simple lumped element VCO. Otherwise the phase-noise of the VCO itself will be visible as noise peaks above the loop bandwidth. The value of the loop bandwidth depends on the divider value N, the charge pump current delivered by the phase comparator output, the slope of the VCO tuning function and finally the values for the components in the loop filter. The loop response must also be calculated to give a decent phase margin and comparator frequency attenuation. For a more systematical treatment of the theory behind phase locked loops there are many books and articles available in the literature.