

# 小型衛星のための 5.8GHz 帯高速通信無線モジュールの開発

田中 卓史 (情報工学部情報工学科)  
田中 崇和 ((株)ロジカルプロダクト)

## Development of a 5.8GHz-band High Speed Communication Radio Module for Small Artificial Satellites

Takushi TANAKA (Department of Computer Science and Engineering, Faculty of Information)  
Takakazu TANAKA (Logical Product Corporation)

### Abstract

We have developed a high speed radio module for small artificial satellites. This module consists of two components: a transmitter using an FSK modulator and a linear amplifier. The transmitter generates a 20mW radio signal in the 5.8 GHz band. This signal can transmit digital data at 115.2 kbps using FSK modulation. The linear amplifier then amplifies the 20mW signal, producing a 4 W output. This radio module can transmit a photograph (320 x 240 pixels) from a model satellite camera in around 22 seconds.

**Key words:** radio module, transmitter, 5.8GHz, C-band, FSK, small artificial satellite

### 1. はじめに

これまで人工衛星の打ち上げは国家プロジェクトとして大規模に行われてきたが、近年、衛星を小型化することでまとめて一度に打ち上げたり、JAXAの主衛星に相乗りさせてもらい、打ち上げコストを大幅に削減することで、小規模な団体でも小型衛星を上げることが可能になっている。そこで、九州大学、九州工業大学と当大学が協力して3大学合同でオーロラ帯の磁気とプラズマの観測を行う九州小型衛星を上げる計画を進めている[1]。著者は同計画の通信主任として衛星地上間の通信システムを担当している。

これまで大学などで開発された小型人工衛星の通信はアップリンクに 145MHz、ダウンリンクに 435MHz のアマチュア無線帯を使うことが多かった。これは小型衛星の実験・研究的な性格がアマチュア無線の目的に適合していたこと、この周波数帯でアマチュア無線のデータ通信が広く行われ、安価なアマチュア無線機器が利用できたことによる。しかしこの周波数帯は利用できる帯域が狭いために、通信速度が 1200bps ~ 9600bps に限られていた。衛星写真

などの多量のデータを日本上空通過中に一度に転送するには少なくともこの 10 倍の通信速度が要求される。より高速の通信を行うには 1.2GHz 帯の利用が考えられるが、IARU(The International Amateur Radio Union)は 1.2GHz 帯における衛星からのダウンリンクを禁止している[2]。そこで次に 2.4GHz 帯の利用が考えられるが、この周波数帯は近年広く使われるようになった無線 LAN の周波数と重なるため、混信の可能性が高く、衛星からの微弱な電波を受信するには適当でない。宇宙研究用、地球観測用の実験局として S 帯(ダウンリンク 2.2GHz)の利用も考えられるが、この周波数帯は JAXA や NASA などの利用で逼迫している。そこで、次に利用できるアマチュア無線帯として、5.8GHz 帯を利用して衛星からの高速のダウンリンクが行える通信システムの構築を目指している。

高速通信を行おうとすると通信速度に比例して占有帯域が広がる。ノイズは帯域幅に比例して増加するので、一定の SN 比を保つためには通信速度に比例して送信電力を上げるか、アンテナの利得を上げることが必要になる。九州小型衛星の場合、太陽電池

による発生電力が20~30W程度に限られており、また、衛星のサイズや姿勢制御の観点から高利得のアンテナを搭載することもできない。そこで地上側でアンテナの利得を上げることになるが、利得と共にアンテナのビーム幅が狭くなり、静止衛星ではないので衛星の追尾が難しくなる。そこで、各々の技術のバランスから実現できる通信速度が決まることになる。この研究では実現する通信速度として115.2kbpsを設定している。この速度は近年インターネットで使われるブロードバンドと比較して決して速くはないが、衛星の送信電力と送受信アンテナの性能から実現できると判断した安全サイドの通信速度である。この速度の通信が実現すると衛星の日本上空通過中に高細精の写真を数枚送ることができるようになる。

## 2. 送信機の構成

送信機の構成を図1に示している。モデル衛星に搭載したカメラは320x240ピクセルの画像をRGBの順に115.2kbpsのシリアル信号を出力する。送信機はこの信号を受け、70kHzのローパスフィルターで帯域制限をして、PLLの基準信号となる40MHzの水晶発振器に変調をかけFSK波を得ている。5.8GHzの生成にはマキシム社の無線LAN(IEEE 802.11a)用トランシーバIC(MAX2828)を利用している。IEEE 802.11aは通信速度が54Mbpsと大きく、そのままでは帯域が広がりすぎて受信機の感度を上げることができず、微弱信号を扱う宇宙通信には適当でない。そこで、このICのPLL(位相ロックループ)の部分だけを利用して5.8GHzの信号を得ている。幸いなことに、日本において最も近接した無線LANの周波数は5.470~5.725GHzとなっており、IARUの定めた衛星からのダウンリンク周波数5.830~5.850GHzと重なることはない。

このICはOFDM(直交周波数分割多重方式)の変復調を行なう回路を備えているが、無線LANの場合と異なり、パラボラアンテナでの受信を想定した衛星通信ではOFDMが効果を発揮するマルチパスの問題は生じず、むしろドップラー効果による周波数の移動の方が問題となる。OFDMの変調部分は搬送波を90度の位相差を持つ2つの搬送波に分け、それぞれに信号を乗算する平衡変調器から構成されている。この部分を利用してMSK(FSK)やQPSK, QAMを行なうことも検討したが、FSKは水晶発信機に変調を

掛ける方が回路的に簡単になること、QPSKやQAMはアマチュア無線の受信機側が対応できていないことから、この部分の回路は使わずに信号をそのまま通過させている。5.8GHzのFSK波はSiGeトランジスタで2段増幅し、5.8GHzの帯域フィルターを通して20mWの出力を得ている。

直交変調によらずFSKを実現するにはVCO(電圧制御発信器)に信号を加える方法とPLLに入力される基準信号自体を動かす方法がある。VCOに信号を加える方式は大きく周波数を動かせるので、変調指数を大きく取ることができるが、PLL自体が一定の周波数に引き戻そうとする働きがあるため、低い周波数の信号は変調が掛からなくなる。PLLに入力される基準信号に変調を掛ける方式は低い周波数での問題は無くなるが、基準信号を作り出す安定な水晶発信器の発振周波数を動かすのであるから、周波数偏移は大きく取れない。

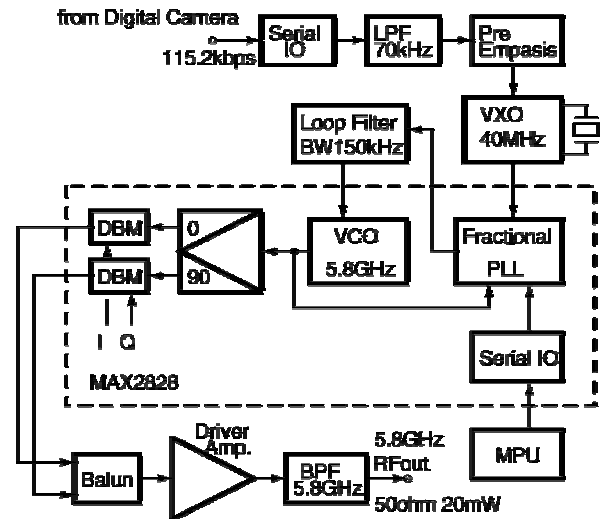


図1 5.8GHz帯送信機のブロック図

Fig.1 Block diagram of 5.8GHz-band transmitter

115kbpsで交互に1と0が繰り返す最も変化の速い信号の基本波成分は57.75kHzになる。この信号に対してFMの変調指数を幾らにするのが良いかを定めることが必要になる。必要なFMの変調指数は復調時のSN比と関係してくる。受信側で信号の振幅成分のノイズを無視できる場合、FM復調時のSN比は(送信側で発生する残留FMノイズ) + (受信側局部発信機の残留FMノイズ)に対する送信側の周波数偏移で決まる。送信側と受信側(5節)の総合した

残留 FM 成分を測定すると 8kHz 弱であった .FSK 復調時のダイナミックレンジはコンパレータで判定できる SN 比がとれば良いので, 12dB(4 倍)とすれば 32kHz の周波数偏移があれば良いことになる . 周波数偏移を少し余裕をみて 40kHz に設定すると, 最高変調周波数 57.75kHz において変調指数は 1 以下となっており, 変調指数の低い場合の計算式から,

$$\text{占有帯域幅} = 2 \times (57.5 + 40) \text{kHz} = 200 \text{kHz}$$

となる . これは商用 FM 放送の占有帯域幅とほぼ同じとなり, FM ラジオで使用される 10.7MHz の中間周波トランスや帯域フィルター(帯域幅 230kHz)がそのまま利用できることを意味する . 帯域フィルターが FSK の占有帯域より少し余裕があることで, ドップラー効果により同調がクリチカルになるのを抑えている .

ここでは水晶発信器の周波数(40MHz)に対して, VCO の発振周波数(5.8GHz)が 145 倍と大きく, 水晶発信器のわずかな周波数偏移も大きく拡大されるので, 水晶発信器の周波数を直接動かす方式(VXO)を採用して必要な周波数偏移を得ている .



図 2 5.8GHz 帯送信機モジュール  
Fig.2 5.8GHz-band transmitter module

### 3. リニアアンプの構成

一般に通信速度を上げると速度に比例して帯域が広がるため, 一定の SN 比を得るには電力も比例して上げることが必要になる . 一方, 衛星の発生電力は太陽電池パネルのサイズから決まるので, 限られた電力しか使うことが出来ない . 九州小型衛星の発生電力を 2~30W 程度と想定すると, 電池に蓄えて送信時に過剰に使ったとしても, 30W 程度が限界と考えられる . そこで, 利用できる電源の能力から送信

出力が決まり, SN 比の不足分は受信アンテナの利得で補うことが必要になる .

開発したリニアアンプは送信器で作られた 5.8GHz の信号を増幅し, アンテナに加えるための電力を作り出す . 送信器より入力された 5.8GHz の信号は二つに分けられ, 2 個の GaAs MMIC(東芝 TMD5872-2)に並列に加えられる . この IC は 5.8GHz において 23dB のゲインを持ち, 単独で使用すると 10mW の入力電力を 2W まで増幅して出力することができるので, 2 個合わせて 4W の高周波出力を得ている . 増幅された信号は 5.8GHz のローパスフィルターを経て, アンテナに出力される . なお, この IC は出力 2W

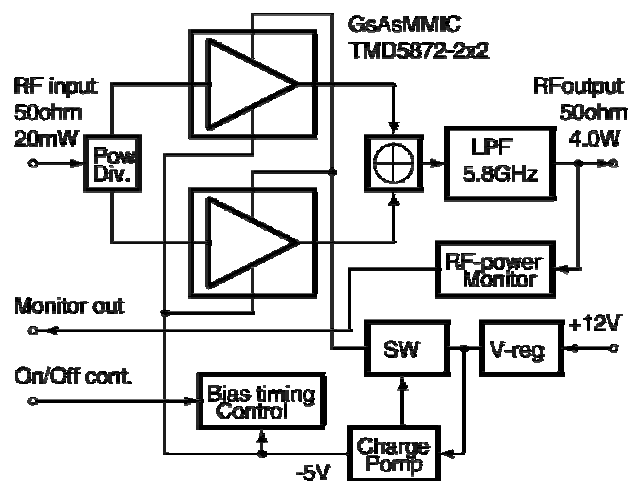


図 3 5.8GHz 帯リニアアンプのブロック図  
Fig.3 Block diagram of 5.8GHz-band Linear Amplifier



図 4 5.8GHz 帯リニアアンプ  
Fig.4 5.8GHz-band Linear Amplifier

を得るための直流入力は 12W(10Vx1.2A)となっており, 2個を用いて 4W の出力を得るために 24W の直流入力が必要になる。

GaAs IC はゲートに負の電圧を加えてからドレイン電圧を加えないと IC を壊してしまうので, 電源回路は電圧レギュレーター, 負電圧の生成回路, バイアスのためのタイミングの回路, スイッチなどから構成される。また, 送信出力をモニターするための回路も付加している。

図5にリニアアンプの特性を実測した結果を示している。最大出力が 4 Wと大きいので, 計測器を壊さないように 30dB のアッテネーターを通して測定を行なった。横軸は入力信号のレベルを表している。青のプロットはアッテネーターを通過した後の出力, 赤のプロットは計算されたリニアアンプの出力である。黄色のプロットはリニアアンプの利得を示している。入力レベルが 10dBm(10mW)までは非常に直線性が良いことが分かる。

OFDM や QAM のような変調波は振幅成分に情報を含むために, リニアアンプの直線部分を使わないと, 波形歪を生じ復調できなくなる。それで, 平均電力としては 1~2W の出力で使うことになる。一方, FSK は振幅成分に情報を持たないので, リニアアンプを飽和させ, トランジスタを高効率で使うことができる。グラフは少し入力を増やすことで, 5W の出力を得ることができることを示している。

#### 4. モデル衛星

送信機の動作を確認するために, モデル衛星にカメラと送信機を搭載して画像転送の実験を行った。図6の写真は Cube Sat(一辺が 10cm の立方体) と呼ばれるクラスのモデル衛星に搭載したものである。アンテナは衛星本体に取り付けるのであるが, 色々なアンテナをテストする必要があるので, 本体とアンテナを分離して同軸ケーブルで結んでいる。図6のヘリカルアンテナはロケット搭載時に小さく折り畳むのが難しくなる。衛星本体からはみ出す部分の少ないパッチアンテナの試作と試験も行っており, 稿をあらためて報告する。

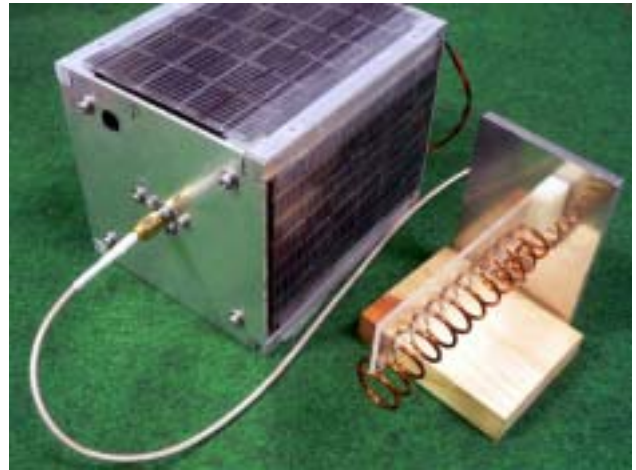


図6 モデル衛星とアンテナ  
Fig.6 Model Satellite and Antenna

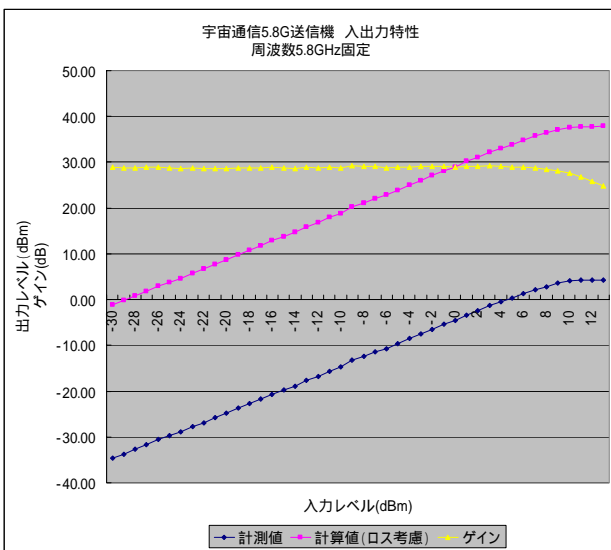


図5 5.8GHz 帯リニアアンプの特性  
Fig.5 Characteristics of 5.8GHz-band Linear Amplifier

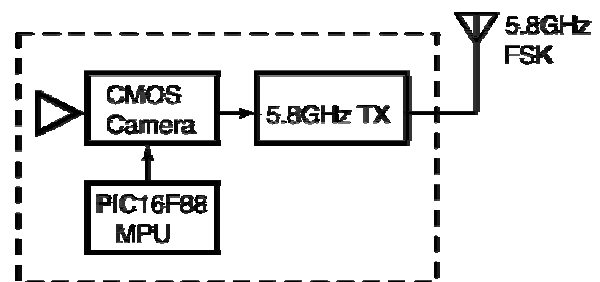


図7 画像送信系のブロック図  
Fig.7 Block diagram for image transmitting system

図7に画像送信系のブロック図を示している。CMOS カメラ(浅草ギ研 CMOS-EYE)はマイクロプロセッサ-PIC16F88 でコントロールしている。カメラ

は 320x240 ピクセルの画像を RGB に分けて各色 8bit の分解能で出力することができる。マイクロプロセッサはカメラにコマンドを送り、160byte を単位として順次画像データを読み出し、115.2kbps で画像データを送信機に送る。

### 5. 画像受信システム

衛星通信にアマチュア無線帯を使用することのメリットは高性能で安価なアマチュア無線機器を利用できることである。しかし、多くのアマチュア無線機器が利用できるのは 1.2GHz 帯までで、2.4GHz 帯以上の周波数では利用できる機器が限られてくる。もう一つの問題点は多くの無線機器が音声通信を想定して作られているので、信号を大きく増幅するための中間周波の帯域が狭く、帯域が広がる高速通信には適用できなかった。

近年、日本アマチュア無線連盟が無線 IP 接続を想定して D-STAR と呼ばれる規格を定め、1 機種ではあるが 1.2GHz 帯で 128kbps のデジタル通信ができる機器(ICOM, ID-1)が市販されている。この無線機はデジタル信号の転送に直交変調を利用しているようであるが、残念ながら回路図が公開されていないので、復調回路は使わずに、1.2GHz での目的信号への同調、第一中間周波(243.95MHz)への変換と増幅、第二中間周波(10.7MHz)への変換までを使って、図 8 に示す画像受信システムを構築した。

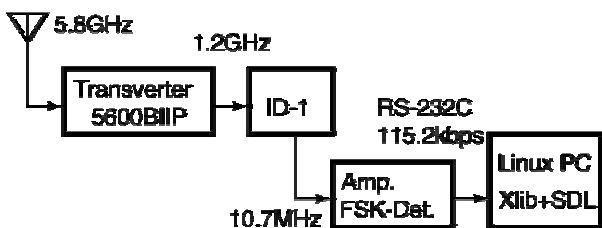


図 8 5.8GHz 帯画像受信系のブロック図  
Fig.8 Block diagram of image receiving system

アンテナで受信した 5.8GHz 帯の信号はトランスバーター(マキ電機, UTV-5600BIIP)により 1.2GHz 帯に変換される。この信号は D-star 無線機 ID-1 に入力され、目的の信号に同調させる。目的の信号は第一中間周波、第二中間周波と変換される。ここで ID-1 から 10.7MHz の信号を取り出し、増幅・検波して FSK の復調を行っている。復調した信号は RS-232C イン

ターフェースで Linux PC に入力し、撮影画像を表示させている。画像表示プログラムは X-window の画像ライブラリ Xlib と SDL(Simple Direct Media Layer)と呼ばれるライブラリを用いて開発を行なった。

RS-232C ポートからは画像の開始の一連の信号に続いて、160byte を単位としてまず赤の画像データが 320x240byte 送られてくる。続いて緑の画像データ、青の画像データと続く。図 9 に示すように赤、緑、青の元データと RGB を合成した画像を受信データとともに順次表示できるようにしている。

### 5. 通信実験

Cube Sat 型の衛星はサイズが小さく発電能力が低いため、リニアアンプは搭載せずに実験を行った。従って、アンテナからは 20mW ほどの電波が放射されていると考えられる。図 6 の写真のヘリカルアンテナでも円偏波用に設計したパッチアンテナでもアンテナを固定せずに、手に持った方向精度の低い状態で、約 3km の距離で画像転送に成功している。

図 9 の画像を受け取るために要する時間は 22 秒ほどである。これまでに上げられている小型周回衛星の通信時間が 10 数分程度であることを考えると、115.2kbps の通信速度はさらに高精細な画像でも、日本上空通過中に数枚は転送できると考えられる。



図 9 受信画像  
Fig.6 Received image

リニアアンプを繋いで出力を 4W に上げると送信電力は 200 倍に強くなる。受信側での電波の強さは送受信間の距離の 2 乗に反比例して減衰するので、

4W 出力時にリニアアンプなしでの 3km 地点と同じ電波の強さになる距離は

$$3\text{km} \times 200 = 42.3 \text{ km}$$

となる。周回衛星との通信にはさらに 10 倍の 400km 以上の通信ができることが必要なので、受信地点で同じ電界強度を得るにはさらに距離の 2 乗の 100 倍の出力が必要になるが、400w は小型衛星には不可能な出力である。衛星側に高利得のアンテナは期待できないので、受信側でアンテナの利得をあげることが必要になる。受信アンテナでさらに 20dB(電力 100 倍)の利得を得ることは不可能ではなく、パッチアンテナを多数個並べたり、パラボラアンテナを使えば実現できると考えられる。しかし、利得と共にアンテナの衛星追尾精度が要求されることになる。

ここで行なった通信実験において使用した受信機はまだ完全に調整されたものではなく、初段のノイズレベルまでは増幅していない。IF の帯域が 200kHz 程度で周波数偏移が 40kHz、復調帯域幅 60kHz のとき、上手に設計・調整された FM 受信機ならば、-107dBm 程度の受信感度 (SN 比 = 10dB) を持っている。受信機の調整で衛星の出力条件やアンテナ利得条件は少し緩和される可能性がある。

## 6. おわりに

日本の大学では昨年までに千葉工大、東工大、東大、日大、北海道工大が JAXA やロシア、インドのロケットを利用して人工衛星を打ち上げている。今年 1 月には JAXA の GOSAT(温室効果ガス観測衛星)との相乗りで東北大、香川大、都立航空高専など、さらに 6 機の衛星が加わった。来年には JAXA の Planet-C(金星観測)との相乗りで鹿児島大の衛星や早大、創価大、東海大の衛星が予定されている。また、九工大では創立百周年記念事業として、来年インドのロケットによる衛星の打ち上げを予定している。福工大は衛星開発においてやや出遅れた感じがするが、これまでの大学発の衛星で高速通信を成功させたものはない。本年 1 月に上がった 6 機の衛星も、正常に動作しているのは東大と東大阪グループの衛星だけのようなのである。特に通信系の不調が衛星にとって致命傷となっている。高速通信の行なえる九州小型衛星や福工大衛星の実現に向けて皆様の御協力をお願いしたい。

## 7. 謝辞

本研究における衛星用通信モジュールは平成 19 年度の JST(科学技術振興機構)の補助金により開発を行った。また、地上局受信システムのうち FSK の増幅・検波部分は平成 20 年度の本学情報科学研究所の短期研究員の研究費を得て開発を行った。

## 参考文献

- [1] 田中卓史, 「小型衛星のための 5.8GHz 帯高速無線モジュール」, 日本航空宇宙学会西部支部講演会(2008)講演集, pp.37-38, 2008.
- [2] The International Amateur Radio Union, “AMATURE RADIO SATELLITES”, <http://www.iau.org/index.html> 2006