

高周波数分解能と低位相雑音の両立を実現する衛星通信用Ka帯コンバータ

清水俊之* 田島賢一**
 中村圭佑* 土谷裕志***
 森 茂久*

Ka-band Converter for SatCom Achieving High Frequency Resolution and Low Phase Noise Property
 Toshiyuki Shimizu, Keisuke Nakamura, Shigehisa Mori, Kenichi Tajima, Yuji Tsuchitani

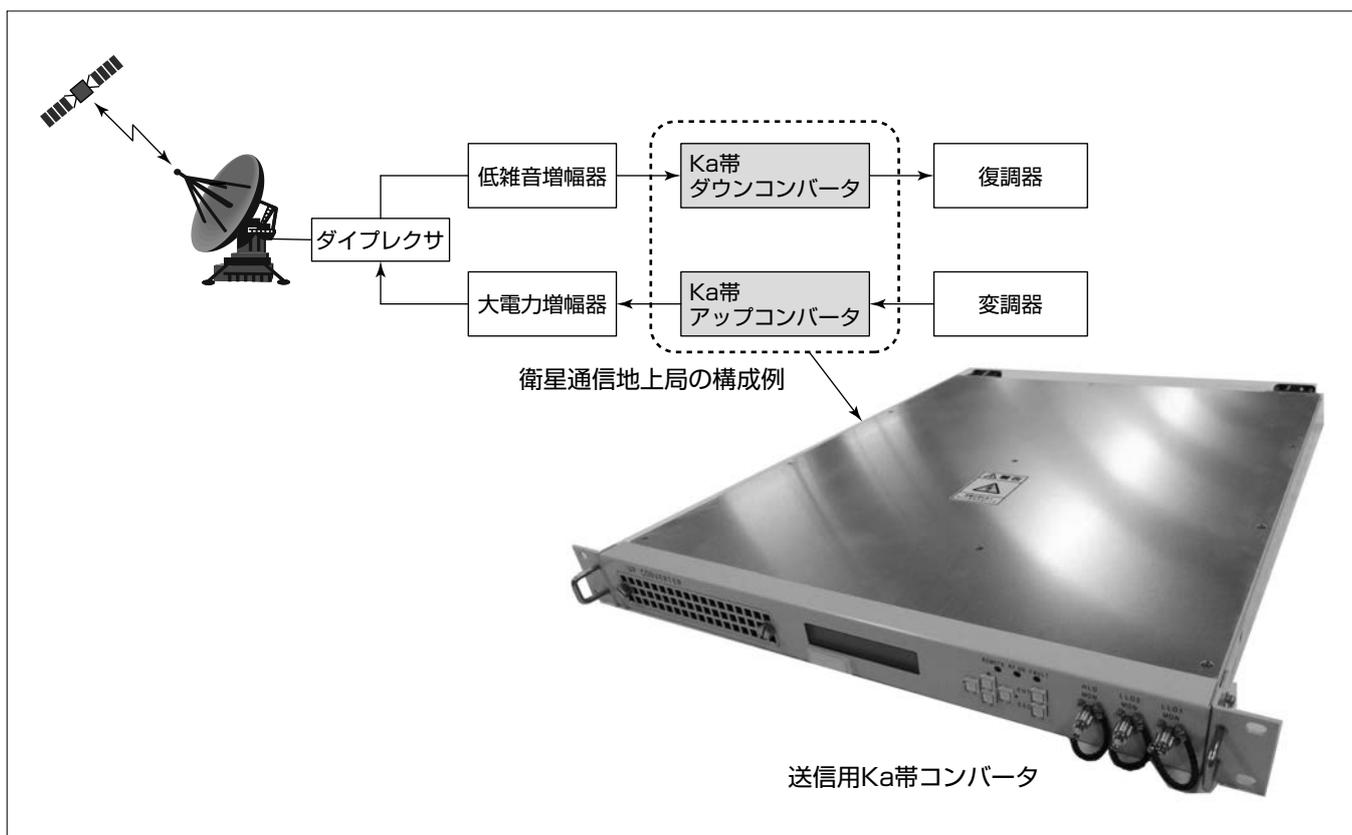
要 旨

近年、衛星通信(SatCom)全般でKu帯周波数の枯渇に伴い、Ka帯を用いたサービスが拡大しつつある。ITU(International Telecommunication Union)から管制用途のフィーダリンク周波数のKa帯への割当てが既に勧告されている。また、移動体通信でも、大容量通信の利用ニーズの高まりを受け、世界各国でKa帯を用いたHTS(High Throughput Satellite)の打ち上げが計画・実現段階にある⁽¹⁾。今後、ますます衛星通信のKa帯への拡大が予想され、それらを実現するKa帯RF(Radio Frequency)回路、とりわけキーデバイスであるコンバータの高性能化・高機能化が期待されている。

今後のKa帯コンバータの需要を見据え、衛星管制と移動体通信の両アプリケーションへ適用可能な衛星通信用

Ka帯コンバータを開発した。この開発では周波数設定自由度を保ちつつ、低離調、高離調の低位相雑音特性を実現するためのDDS(Direct Digital Synthesizer)駆動型PLL(Phase Locked Loop)及びミキシングダウンPLLを組み合わせた局発信号源構成を採用している。開発品の実測結果から、両構成で懸念されるスプリアス特性の劣化を解決し、他社より優れた周波数分解能と実測で他社に匹敵する低位相雑音の両立を実現した。

今後、開発したKa帯コンバータを国内管制局事業、移動体通信事業への展開を図るとともに、今回蓄積したKa帯RF回路の開発で得られた知見を他Ka帯事業に展開していく。



衛星通信用地上局用Ka帯コンバータ

上の図は、衛星通信用地上局の構成例である。衛星管制用のコンバータはアンテナと接続され、衛星通信を実現する。右下の図は、送信用Ka帯コンバータの開発品である。パネルフェースには盤面操作用のLCD(Liquid Crystal Display)画面、スイッチ及び保守点検用の局発信号モニタポートを配置し、運用面での使用性を考慮した。

*三菱電機(株) 通信機製作所 **同社 情報技術総合研究所
 ***三菱電機マイコン機器ソフトウェア(株)

1. ま え が き

近年、衛星通信全般でKu帯周波数の枯渇に伴い、Ka帯を用いたサービスが拡大しつつある。ITUから管制用途のフィーダリンク周波数のKa帯への割当てが既に勧告されている。また、移動体通信でも、大容量通信の利用ニーズの高まりを受け、世界各国でKa帯を用いたHTSの打ち上げが計画・実現段階にある。今後、ますます衛星通信のKa帯への拡大が予想され、それらを実現するKa帯RF機器、とりわけキーデバイスであるコンバータの高性能化・高機能化が期待されている。

2章で衛星管制及び移動体通信に要求される技術課題、3章で周波数設定自由度と低位相雑音化の両立への課題、4章で今回製品化したKa帯コンバータの性能及び実測結果について述べる。

2. 衛星通信用Ka帯コンバータの技術課題

2.1 衛星通信でのコンバータの役割

衛星通信で、コンバータは送受信信号の周波数変換機能を担う装置である。衛星通信地上局の構成例を図1に示す。通信量の大容量化やアンテナの小型化要求に対応するため、衛星-地上局間を伝播(でんぱ)するRF信号の周波数にはL~Ka帯の高周波が選ばれる。一方、送信信号を生成する変調器、受信信号からデータを取り出す復調器のインターフェースであるIF(Intermediate Frequency)信号は70/140MHzやL帯、S帯など回路内の取扱いが容易な比較的低い周波数で実現される。これらの周波数の違いを吸収するため、局発信号を用いた周波数変換を行うコンバータが用いられる。

2.2 衛星管制と移動体通信での通信の特徴

衛星管制と移動体通信での通信の特徴と、それぞれの通信でのコンバータへの技術課題について述べる。

2.2.1 衛星管制

衛星管制では、衛星に対する姿勢制御と通信制御を目的とした数100bps~1Mbps程度の低ビットレートの狭帯域変調信号の送受信を行う。衛星管制でのコンバータに要求される技術課題を次に示す。

- (1) 高い設定周波数分解能と広い周波数設定範囲を持ち、周波数調整に対し柔軟に対応できること
- (2) 低離調の位相雑音特性が良好であり、狭帯域信号の伝送が可能であること

特にKa帯のコンバータは周波数変換に用いる局発信号の周波数が高いため、周波数設定の自由度を維持しつつ低離調の位相雑音特性を低減するためには局発の信号源に工夫が必要である。

2.2.2 移動体通信

移動体通信では主として放送やブロードバンド回線の

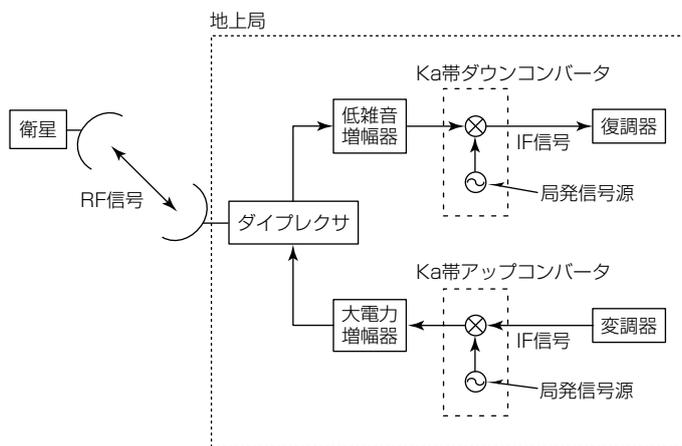


図1. 衛星通信地上局の構成例

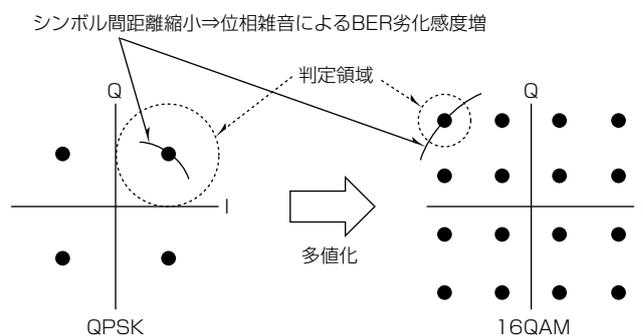


図2. 変調信号を多値化した場合の位相雑音の影響例

提供を目的とし、高速通信を実現するため広帯域な多値変調信号を用いた数100Mbps以上の伝送を行う。現在、8PSK(Phase Shift Keying)、16APSK(Amplitude PSK)、16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)等の多値変調信号を用いるHTSの実現が計画されている。

これらの広帯域な多値変調信号を用いる場合、変調信号の帯域幅に応じて高離調でも低位相雑音特性が要求される。変調信号を多値化(QPSK(Quadrature PSK)→16QAM)した場合の位相雑音の影響例を図2に示す。多値変調信号ではシンボル間距離が縮小されてコンステレーションが配置されることから、位相雑音特性に対する感度が高まり、位相雑音特性の劣化がビット誤り率(Bit Error Rate: BER)の劣化へ直結する。このことから、高速通信を実現する移動体通信に用いるコンバータには厳しい位相雑音特性が要求される。

2.3 開発の狙い

今後の衛星通信のKa帯拡大によるコンバータ需要へ対応するため、今回製品化したKa帯コンバータは、衛星管制と移動体通信に要求される技術課題を踏まえ、次の特長の実現を目標に開発を行った。

- (1) 周波数設定自由度の実現(高設定周波数分解能、広周波数設定範囲)
- (2) 低離調、高離調の両域での低位相雑音の実現

3. 周波数設定自由度と低位相雑音の両立

図1に示すとおり、コンバータの内部には局発信号源が実装されており、同じく内蔵されるミキサに対して局発信号を供給する。2章で述べたコンバータの周波数設定の自由度や低位相雑音はこの局発信号源に対して課せられた要求でもある。この章では、局発信号源の周波数設定自由度と低位相雑音の両立について述べる。

3.1 局発信号源の構成

局発信号源は周波数の正確性を期すため、一般に基準信号に同期する位相同期発振器の構成を用いる。位相同期発振器の構成は数多く存在するが、ここでは代表的な構成例について述べる。図3に位相同期発振器の構成例⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾を示す。また、表1に位相同期発振器の各構成例の比較を示す。

図3(a)に示したプリスケアラPLL(Phase Locked Loop)は一般的な位相同期発振器の構成である。分周比Rで分周した基準信号と分周比Nで分周した電圧制御発振器出力を位相比較器で位相比較し、その結果得られる電圧に基づいて電圧制御発振器の出力周波数が決定される。この出力信

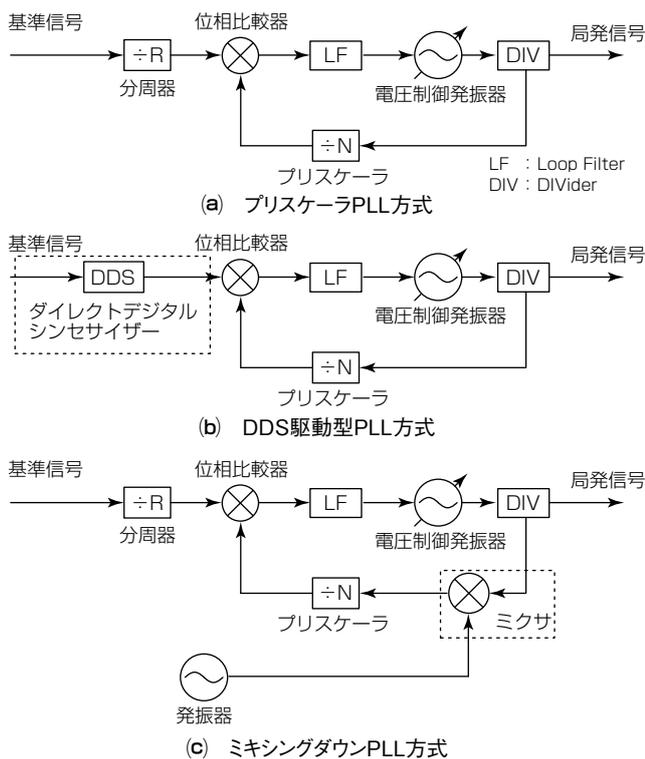


図3. 位相同期発振器の構成例

表1. 位相同期発振器の各構成例の比較

実現方式	周波数設定分解能	位相雑音(位相比較器雑音成分)	スプリアス特性
プリスケアラPLL	低分解能	雑音大	○
DDS駆動型PLL	高分解能	雑音大	量子化雑音(DDS) エイリアス(DDS)
ミキシングダウンPLL	低分解能	雑音小	ミキシング プロダクト

号を局発信号としてミキサへ供給する。この場合、周波数設定分解能は分周後の基準信号で決定され、自由度が低い。また、位相雑音を決定する要因の1つである位相比較器の雑音成分もN倍されるため大きくなる。

図3(b)に示したDDS(Direct Digital Synthesizer)駆動型PLLは分周比Rの代わりにDDSを用いる構成である。DDSを用いることによって1 Hz以下の分解能を実現することも可能になる。ただし、DDSは内蔵するDAC(Digital to Analog Converter)に起因する量子化雑音、エイリアスによるスプリアスも出力するため、スプリアス特性の劣化が懸念される。一方、位相雑音での位相比較器の寄与はプリスケアラPLLと変わらず、ループ内の分周期のNによって決定される。

図3(c)に示すミキシングダウンPLLはループ内にミキサを実装し、電圧制御発振器出力を低い周波数へ変換する構成である。ループ内で周波数変換を行うことで、ほかの構成に比べて分周比Nを小さくすることが可能である。ほかの構成と同様、位相比較器の雑音がN倍されるが、Nが小さくなるため、位相比較器の雑音の寄与を極めて小さくすることができる。ただし、ループにミキサを用いることによってミキサから出力されるスプリアスへの対策が必要であり、DDS駆動型PLL同様スプリアス特性の劣化が懸念される。

3.2 開発品構成の検討結果

開発品のKa帯コンバータに内蔵する局発信号源は、高い周波数分解能と低位相雑音を実現することを目標にDDS駆動型PLLとミキシングダウンPLLを組み合わせることで実現することにした。両構成を組み合わせることによって、DDSの高分解能と周波数変換による位相雑音の低減が可能となる。DDSの量子化雑音やエイリアスによるスプリアスは事前評価で行った確認結果に基づいて設計を行い、ミキサから出力されるスプリアスはコンバータ設計に用いる独自のシミュレータを用いたシミュレーション結果に基づいて対策を行った。

4. 開発品Ka帯コンバータの性能

表2に送信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧を示す。参考に海外他社同等品の性能指標も列記する。当社開発品では周波数分解能1 Hzを達成している。また、10Hzから100Hz離調の位相雑音特性は他社を凌駕(りょうが)した特性が得られている。また、10kHz離調以上の高離調の位相雑音特性についても移動体専用品以外のコンバータに対して優位な特性が得られている。

表3に受信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧を示す。送信同様、参考に海外他社同等品の性能指標も列記する。受信用も当社開発品では周波数分解能1 Hzを達成しており他社に対して優位性を確保できている。また、10kHz離調以上の高離調の位相雑音特性についても移動体専用品

表2. 送信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧

	当社開発品	A社(管制用)	A社(移動体用)	B社
入力周波数	70/140MHz	70/140MHz	L帯	70/140MHz
出力周波数	30GHz帯	30GHz帯	30GHz帯	30GHz帯
利得	13dB以上	30dB nom	30dB nom	40dB nom
周波数分解能	1 Hz	1 kHz	固定	100Hz
スプリアス	-60dBc以下	-60dBc以下	-65dBc以下	-40dBc以下
位相雑音	10Hz	-59dBc/Hz	-49dBc/Hz	-53dBc/Hz
	100Hz	-69dBc/Hz	-63dBc/Hz	-70dBc/Hz
	1 kHz	-76dBc/Hz	-69dBc/Hz	-81dBc/Hz
	10kHz	-94dBc/Hz	-79dBc/Hz	-87dBc/Hz
	100kHz	-94dBc/Hz	-91dBc/Hz	-90dBc/Hz
	1 MHz	-107dBc/Hz	-109dBc/Hz	-124dBc/Hz

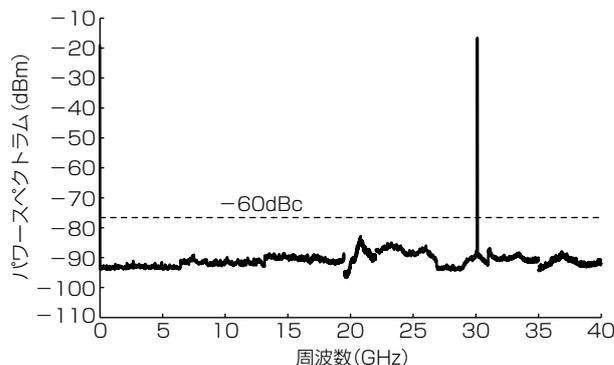


図6. 送信用Ka帯コンバータのスプリアス実測結果

表3. 受信用Ka帯コンバータ開発品の性能一覧

	当社開発品	A社(管制用)	A社(移動体用)	B社
入力周波数	20GHz帯	20GHz帯	20GHz帯	20GHz帯
出力周波数	70/140MHz/S帯	70/140MHz	L帯	70/140MHz
利得	12dB以上	30dB nom	35dB nom	40dB nom
周波数分解能	1 Hz	1 kHz	固定	100Hz
スプリアス	-60dBc以下	-60dBc以下	-65dBc以下	-40dBc以下
位相雑音	10Hz	-41dBc/Hz	-49dBc/Hz	-58dBc/Hz
	100Hz	-66dBc/Hz	-63dBc/Hz	-78dBc/Hz
	1 kHz	-83dBc/Hz	-69dBc/Hz	-88dBc/Hz
	10kHz	-102dBc/Hz	-79dBc/Hz	-93dBc/Hz
	100kHz	-102dBc/Hz	-91dBc/Hz	-95dBc/Hz
	1 MHz	-117dBc/Hz	-109dBc/Hz	-124dBc/Hz

相当の特性が得られている。

図4に送信用Ka帯コンバータ開発品の位相雑音実測結果、図5に受信用Ka帯コンバータ開発品の位相雑音実測結果を示す。送受とも高離調の位相雑音特性も実測では移動体専用品相当の良好な位相雑音特性を示している。また、図6に送信用Ka帯コンバータのスプリアスの実測結果を示す。局発信号のリークやその他スプリアスもなく、スプリアス特性は-60dBc以下であることを確認した。

これらのおり、開発したKa帯コンバータは送信用、受信用とも良好な位相雑音特性を示していることを確認した。また、採用した局発信号源の構成によって懸念されたスプリアス特性も良好であることを確認した。

5. む す び

拡大するKa帯の衛星通信への適用を狙って開発を行ったKa帯コンバータについて述べた。この製品は衛星管制用途、移動体通信用途の両方に適用可能となるよう周波数設定の自由度を持たせつつ、専用品に匹敵する低位相雑音特性を実現しており、他社より性能面で優位である。今後、国内管制局事業、移動体通信事業への展開を図るとともに、今回蓄積したKa帯RF回路の開発で得られた知見を他Ka帯事業に展開していく。

参 考 文 献

- (1) 後藤祐介：次期技術試験衛星の実現に向けて、通信ソサイエティマガジン，電子情報通信学会，11，No.1，72～78 (2017)
- (2) 伊東健治：低雑音PLLシンセサイザの基礎，MWE2014基礎講座 (2014)
- (3) 小沢利行：PLL周波数シンセサイザ・回路設計法—LSIの使い方とトラブルシューティング—，総合電子出版社 (1994)
- (4) 小宮 浩：高周波PLL回路のしくみと設計法第二版，CQ出版社 (2013)

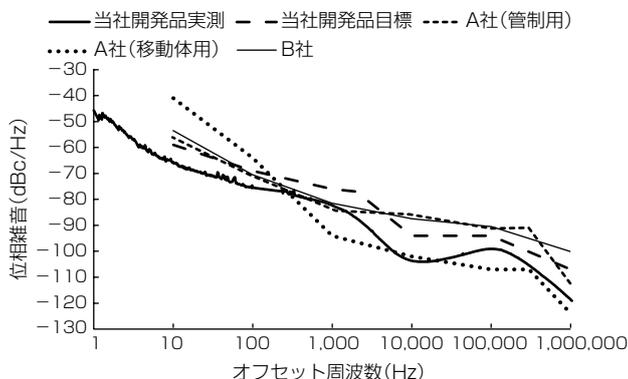


図4. 送信用Ka帯コンバータの位相雑音実測結果

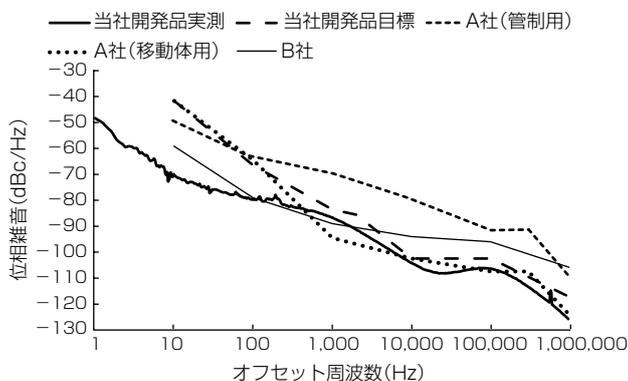


図5. 受信用Ka帯コンバータの位相雑音実測結果