

飛翔体の VLBI 群遅延計測に適した信号形態についての検討

Signal shape effective for spacecraft VLBI group delay measurement

関戸 衛、市川 隆一、情報通信研究機構 宇宙電波応用グループ

M. Sekido and R. Ichikawa, National Institute of Information and Communications Technology

Abstract Assist of Very long baseline interferometry (VLBI) observation in addition to range and range rate measurement of spacecraft can improve the precision of spacecraft navigation. Measurement precision of Group delay, which is observable of VLBI observation, is inversely proportional to the bandwidth of the signal. Although since the signal transmitted from spacecraft is limited at band width and transmission power, optimal signal appropriate for precise group delay measurement should be considered. This paper discuss about multi-tone signal using overshooting oscillation of rectangular cyclic signal as a candidate for that. Overshooting oscillation can easily generated with analog circuit, so that can be an advantage for spacecraft onboard signal generator.

1 はじめに

飛翔体の VLBI(超長基線電波干渉計)観測における観測量の一つである、群遅延量を精度よく求めることは、VLBI を使った飛翔体の位置の計測 [1, 2] にとって非常に重要である。群遅延量の計測精度は、受信する信号の帯域と深く関係しており、測地 VLBI 観測では、クエーサなどの天然電波源の信号を数百 MHz の帯域幅で観測し、数 10ps 程度の精度で群遅延が求められる。飛翔体の人工信号では、飛翔体で利用可能な電力と送信機の出力帯域幅、周波数割り当て、などの制限により、そのような広帯域の信号は利用できないが、限られた資源を使って、できるだけ精度のよい群遅延計測ができるように、飛翔体の送信する信号について検討する必要がある。今回、群遅延量を精度よく求めるための信号を検討するにあたって、送信信号のスペクトルパターンと、遅延分解数*の関係を、いくつかの場合について調べてみた。

2 信号特性と遅延計測精度

飛翔体から送信する信号のパターンは、オンボードもしくは地上からのアップリンクにより、生成されるので、いかなる変調信号も原理的には可能であると仮定する。疑似ランダム拡散の場合、帯域 B (Hz) に信号が拡散しているとすると、トータルの送信パワーを $P(W)$ として、単位周波数あたりのパワーは、 $S_{pn} = P/B(W/Hz)$ である。ノイズの大きさを単位周波数あたり N (W/Hz) とすると、信号対雑音比 (SNR) は $SNR_{pn} = P/NB$ となる。一方、同様に帯域 B に信号を分布させる場合でも、マルチトーンの信号を M 本立てる場合には、一本のトーン信号あたりのパワーは、 $S_{mt} = P/M$ (W) なので、信号のある周波数部分だけ切り出すことができる場合の SNR は $SNR_{mt} = P/NM$ である。信号帯域幅 B は数十 kHz ~ 数十 MHz 程度あるので、マルチトーンの場合に周波数フィルタリングして、信号の含まれる周波数部分だけを

切り出して処理するとすると、 $10^4 \sim 10^5$ 程度のファクターでマルチトーンの方が有利となる。そこで、ここではマルチトーンの信号を使うことを考える。マルチトーン信号を作る場合、電子回路において信号の基本周波数の整数倍の高調波は非線型性を利用することで比較的容易に作ることができるので、ある周波数間隔の整数倍のマルチトーンを想定することにする。

群遅延の決定精度を左右する遅延分解関数は、2 局の VLBI 観測局の受信信号の相互相関処理により生成されるが、信号のスペクトルを複素表示で $S(\omega)$ とすると、相互相関関数は、相互相関処理のため $|S(\omega)|^2$ の関数となる。つまり、遅延分解関数は、周波数スペクトル強度分布のみによって一意に決まるとい性質がある。測地 VLBI では相互相関関数のピークの位置で遅延を計測するため、時間領域での相互相関関数を遅延分解関数と呼んでおり、遅延分解関数のピークの鋭さが遅延の計測精度を決める。ピークの鋭さは、その信号に含まれる高周波成分により決まるため、一般に広い周波数帯域を持った信号の方がより鋭いピークを持つ。周波数軸上の複素スペクトルデータから時間領域の信号のピークを求める処理は、周波数軸上の位相傾斜を最小 2 乗推定することと等価であることが知られており、その決定精度は有効帯域幅[†]に反比例する [3]。有効帯域幅を広くとるには、周波数軸上の広い帯域に信号が存在する必要がある。キャリアに対して側帯波を考えると、より外側に強い側帯波をもつ信号が望ましいということになる。

3 矩形波のオーバーシュート信号

具体的にどのような時間波形の信号を生成するか考えるにあたり、電子回路で生成の容易なことも、衛星に搭載することを考えると重要である。電子回路で生成が容易なものとして、周期的矩形波のオーバーシュート信号を考えてみる。信号を次の式で表現するとする。

$$x(t) = H(t) + A \exp\{-at\} \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

ここで $H(t)$ は矩形波 (5MHz) を表す矩形関数である。

[†]平均周波数の回りの分散で定義される

*VLBI で群遅延を計測する際に、相関処理の結果得られるフリンジ (干渉縞) を時間領域で表示したもの (相関関数)。遅延分解能を上げるにはこの関数のピークが鋭いことが望ましい。

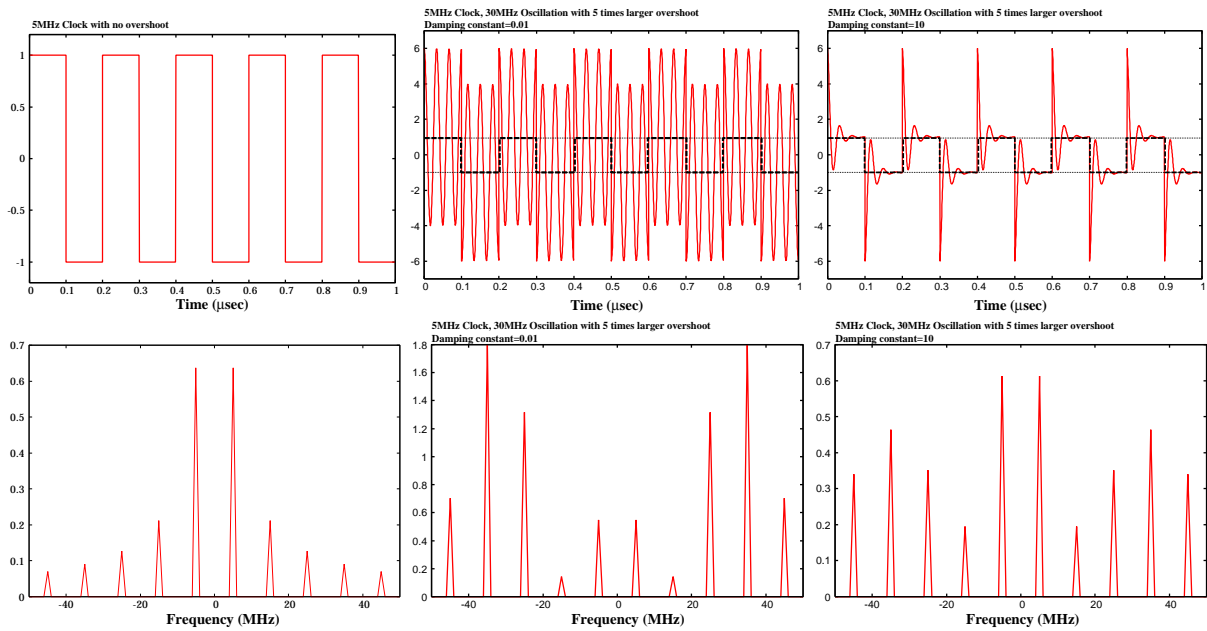


Figure 2: Rectangular cyclic signal (left) and those with overshooting oscillation ($f=30\text{MHz}$) with damping constant $a=0.01$ (center) and $a=10$ (right) are plotted in time domain (upper) and frequency domain (lower).

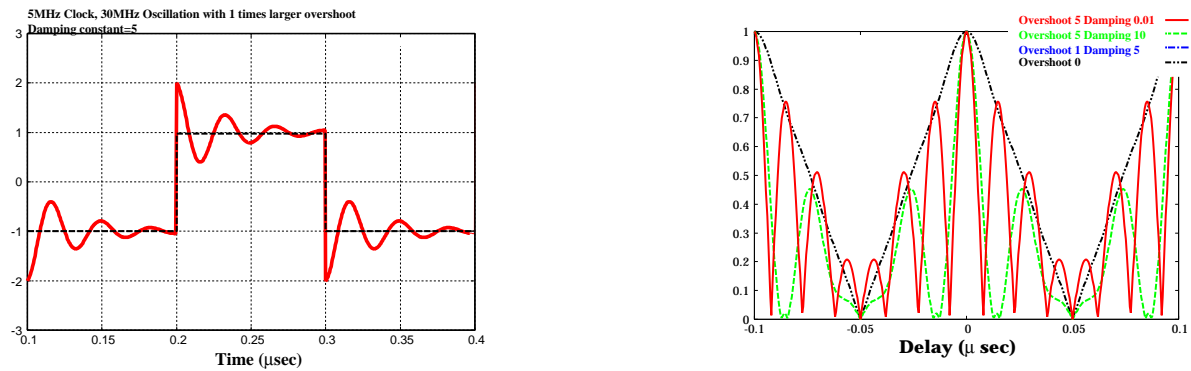


Figure 1: Example of rectangular cyclic signal (5 MHz) with overshoot oscillation ($A=5, f=30\text{MHz}, a=5$).

Figure 3: Correlation function of the cyclic rectangular signal and of that with overshooting oscillation.

Fig. 1に ($A=1, a=5, f=30\text{MHz}$) の波形例を示す。このようなオーバーシュート信号は電子回路で比較的簡単に生成できると考えられるので、探査機本体に信号の生成装置を載せた場合でも大きな負担とならず実現できる可能性がある。具体例として、周波数 5MHz の矩形波とそのオーバーシュート振動 (振動 30MHz、振幅 5) の減衰が 0.01、よび 10 の場合について、その時間波形と、周波数スペクトルを Fig. 2 に示す。周波数 5MHz の整数倍にラインスペクトルが出るが、ここで仮定した信号が理想的矩形波なのでヌル点のためここでは 10MHz 間隔となっている。オーバーシュート後の振動がある場合には、振動周期 30MHz の近傍 35MHz のスペクトルが強くなっている。探査機の信号帯域幅の制限を $\pm 50\text{MHz}$ と想定し、それより高周波の信号をカットした信号の相関関数を Fig. 3 に示す。図からわかるように、オーバーシュートのない信号の場合には相互相関関数は、ピークの鈍った三角波であるが、オーバーシュートが入ることにより相互相関関数が鋭くなることわかる。また、オーバーシュート後

の振動が継続する場合には、相互相関関数のサイドローブが大きくなり、あまり好ましくない。オーバーシュートの振幅は大きい方が相互相関関数も鋭くなる。

今回、比較的広い側帯波を電子回路で比較的容易に生成できる具体例として、周期的矩形波がオーバーシュートした信号について検討した。今後も他に容易に側帯波を生成できる信号形態がないか、あるいは、具体的な電子回路構成など検討する必要がある。

References

- [1] Brunn, D.L., R. A. Preston, S.C. Wu, H. L. Siegel, D. S. Brown, C.S.Christensen, and D.R. Hilt, DSN, "Δ VLBI Spacecraft Tracking System Demonstration: PartI. Design and Planning", Progress Report 42-45, 111/132 (1978)
- [2] 浅井義彦、西村敏充, "差分 VLBI 技術を用いた高精度軌道決定", 計測自動制御学会論文集 Vol. 35, No.4, 467/472(1999).
- [3] 高橋富士信、近藤哲朗、高橋幸雄, "VLBI 技術" オーム社 ISBN 4-274-07852-3, p110 (1997).