

だいち (ALOS) 搭載直接送信部 (DT) 伝送不具合解析

Transmission malfunction analysis of Direct Transmission subsystem installed on Advanced Land Observing Satellite (ALOS)

通信・データ処理技術グループ 谷島正信, 白倉政志, 市川愉, 高田昇
Telecommunications and Data Handling Engineering Group M. Yajima, M. Shirakura, S. Ichikawa, N. Takata

Abstract

This paper describes the transmission malfunction analysis of Direct Transmission subsystem (DT) installed on Advanced Land Observing Satellite (ALOS). This study starts in order to pursue the transmission malfunction cause and cope with it. We got a lot of important information and would like to start a study to investigate some subjects in the near future.

1. はじめに

本研究は、平成 18 年 1 月 24 日に H-IIA により打ち上げられた、だいち (ALOS) に搭載されている直接送信部 (DT) を用いて鳩山受信局にデータを伝送した際に発生した伝送不具合の原因究明、および対策を検討することを目的として開始され、種々の不具合解析を実施したものである。本研究は、だいち X バンド伝送ロックオフ調査・対策チームにおいて実施した不具合原因究明・対策検討の一環であることから、平成 17 年度で終了するものであるが、得られた知見に基づく更なる検討課題について、適切な時期に研究を再開することを考えている。

2. 研究の概要

平成 17 年度は、不具合原因究明を目的として以下の項目について検討を行った。

(1) DT 伝送系における地上局 IF フィルタの評価解析

DT 伝送不具合の副要因である、地上局狭帯域 IF フィルタの今後の改善のため、シミュレーションモデルを作成し、IF フィルタの必要帯域について解析を実施した。

(2) QPSK 変調スペクトラムと地上局 RF 信号受信レベルの時間変動の解析

鳩山受信局の受信設備において取得された QPSK 変調スペクトラムと地上局 RF 信号受信レベルの時間変動の原因を追究するために、シミュレーションモデルを作成し、シミュレーション解析を実施した。

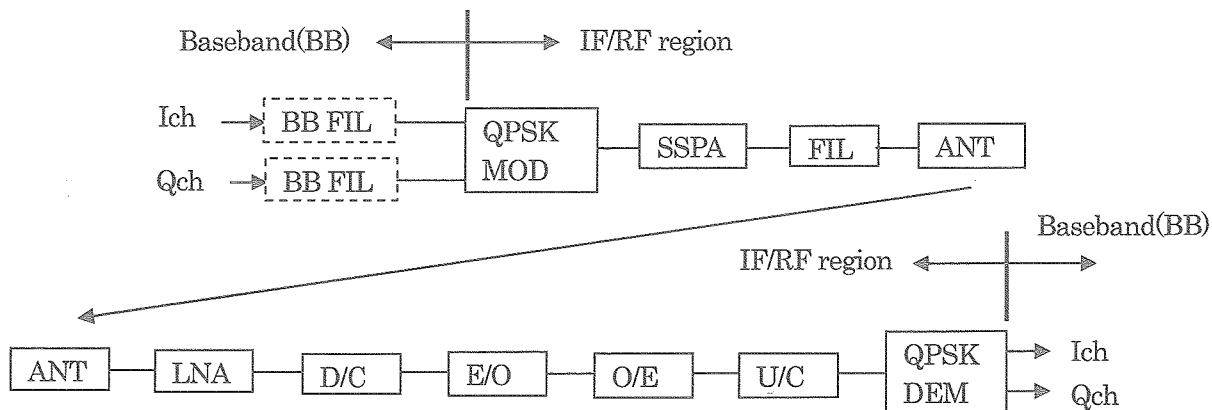
(3) 再生搬送波、ビット同期、フレーム同期ロックオフの原因究明解析

(2) の検討結果を踏まえ、ベースバンド信号モデルを作成し、シミュレーション解析を実施した。その結果を基に、原因究明を行った。

3. 成果の概要

(1) DT 伝送系における地上局 IF フィルタの評価解析

Fig. 1 に衛星から地上局までの DT 伝送系の構成ブロック図を示す。本件では、地上局 IF フィルタに着目して信号劣化に関する評価解析を行うものとする。信号劣化はビット誤り率 (BER) により評価する。



BB FIL : Baseband Filter
 D/C : Frequency down-converter
 U/C : Frequency up-converter
 E/O : Electrical signal – optical signal converter
 O/E : Optical signal – electrical signal converter

Fig. 1 Configuration blocks of DT transmission subsystem

シミュレーションモデルを Fig. 2 に示す。主なシミュレーション条件を以下に示す。

- PN (Pseudo-random Noise ; 擬似) 信号は一般性を保つために ALOS と同様高次の生成多項式により発生
- 送信側のベースバンドフィルタ (BB FIL) は、DT 構成と同一とするため、無しとする。
- FILTER は、-3 dB 帯域幅を 80 MHz とした 5 次のバターワース、140 MHz で 1 次のバターワースを 2 個連続接続したもの (1 つは衛星側の IF フィルタを模擬)、FILTER 無しの 3 ケースとする。
- QPSK 変調器、復調器の特性は理想とする。

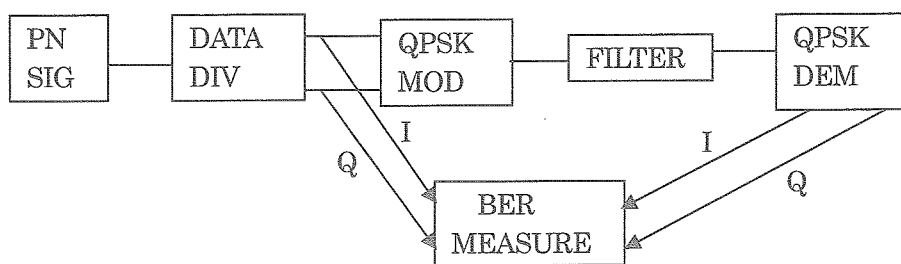


Fig. 2 Simulation model

シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。

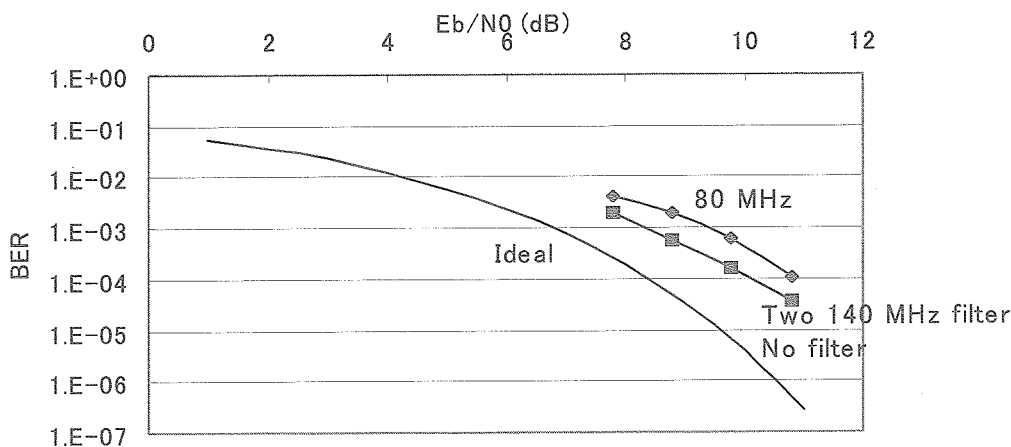


Fig. 3 Simulation results

-3 dB 帯域幅を 140 MHz とした 2 個の 1 次バターワースフィルタの場合とフィルタが無い場合の結果は同一であった。フィルタが無くても理論値にならないのは、送信側にベースバンドフィルタ (BB FIL) を挿入していないことが主要因である。したがって、地上局の IF フィルタの帯域を 140 MHz とすれば IF 帯における帯域制限による信号劣化は無いといえる。

よって、地上局の IF フィルタの帯域を 140 MHz 以上とすることが適当であるといえる。

(2) QPSK 変調スペクトラムと地上局 RF 信号受信レベルの時間変動の解析

約 10 分のだいち運用中に、Fig. 4 に示すように QPSK 変調スペクトラムが正常時の波形から、右肩上がり、左肩上がりに変化する事象が観測された。図の中心に存在する凹凸は、QPSK 変調信号の Ich, Qch に同一の PN (Pseudo-random Noise) 系列を採用し、かつ、Qch は Ich より 2 ビット遅延しているため、Ich と Qch のデータ

の相関により発生しているものであり、ロックオフ事象との関連性は無い。本件（凹凸の発生）はシミュレーションにより確認済みである。

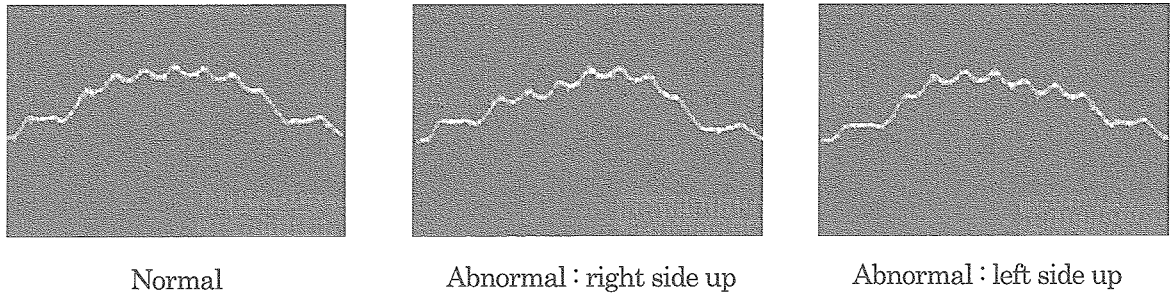


Fig. 4 Examples of QPSK modulation spectrum

この事象の原理を以下に説明する。地上局で直接受信される QPSK 変調信号（直接波）を $f(t)$ とすると、マルチパスにより衛星構体等に反射して地上局に受信される信号（反射波）は $a \cdot f(t - \tau)$ で表すことができる。但し、 a は直接波の振幅レベルを 1 としたときの相対振幅レベル、 τ は遅延時間である。地上局で受信される合成波 $g(t)$ は次式で表される。

$$g(t) = f(t) + a \cdot f(t - \tau) \quad (1)$$

合成波 $g(t)$ のスペクトラム $G(j\omega)$ は、直接波 $f(t)$ のスペクトラム $F(j\omega)$ を用いて表すと次式のようにになる。

$$G(j\omega) = F(j\omega) + a \cdot F(j\omega) \cdot e^{j\omega\tau} = \{1 + a \cdot e^{j\omega\tau}\} F(j\omega) \quad (2)$$

Fig. 4 に示す変調スペクトラムはスペクトラムアナライザ（スペアナ）により測定されたものであるため、式(2)に示す合成波の周波数成分は電力値で表示される。したがって、式(8.2)の $F(j\omega)$ の係数 $B(j\omega)$ は 2 乗する必要がある。そこで、 $|B(j\omega)|^2$ を計算すると次式のようにになる。

$$\begin{aligned} |B(j\omega)|^2 &= \{1 + a \cdot \cos(\omega\tau) + ja \cdot \sin(\omega\tau)\} \cdot \{1 + a \cdot \cos(\omega\tau) - ja \cdot \sin(\omega\tau)\} \\ &= 1 + a^2 + 2a \cdot \cos(\omega\tau) \end{aligned} \quad (3)$$

搬送波周波数 8.105 GHz に対し、Fig. 4 のスペアナのスパン（出力画面全体の周波数帯域）は 200 MHz であることから、周波数範囲は 8.005 ~ 8.205 GHz である。本件で対象とする遅延時間 τ の値は 0.1 ~ 10 ns とすると、 $\omega\tau$ の値は 2π の整数倍であり十分大きいことから、式(3)の ω の周波数は搬送波周波数 8.105 GHz に固定したとしても結果に影響は無いと考えることができる。そこで、このときの τ をパラメータとした $|B(j\omega)|^2$ の値のシミュレーション結果を Figure 5 に示す。 a の値は 0.4 とし、横軸の周波数範囲は 8.005 ~ 8.205 GHz とし、縦軸のレベルは正規化して表示している。 a の値が 0.4 というのは、D/U 比（Desired signal to Undesired signal ratio）-8.0 dB に相当する。

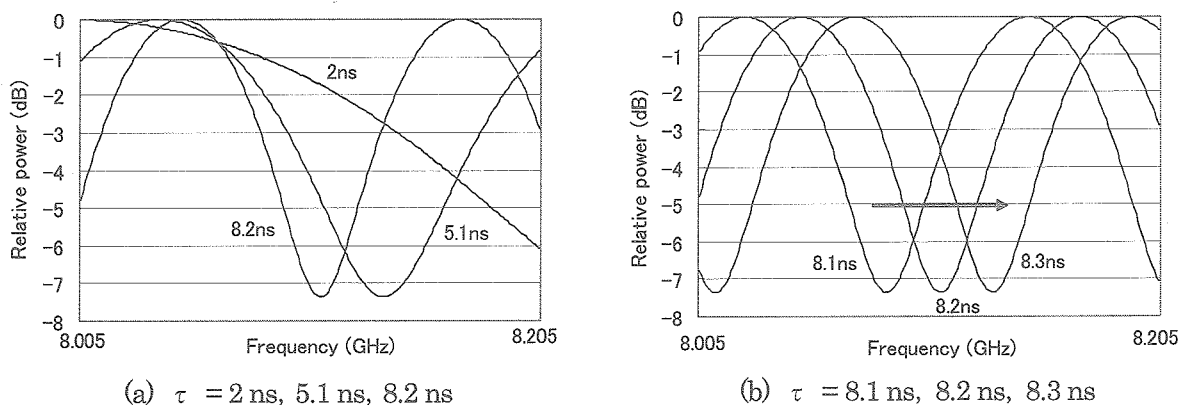
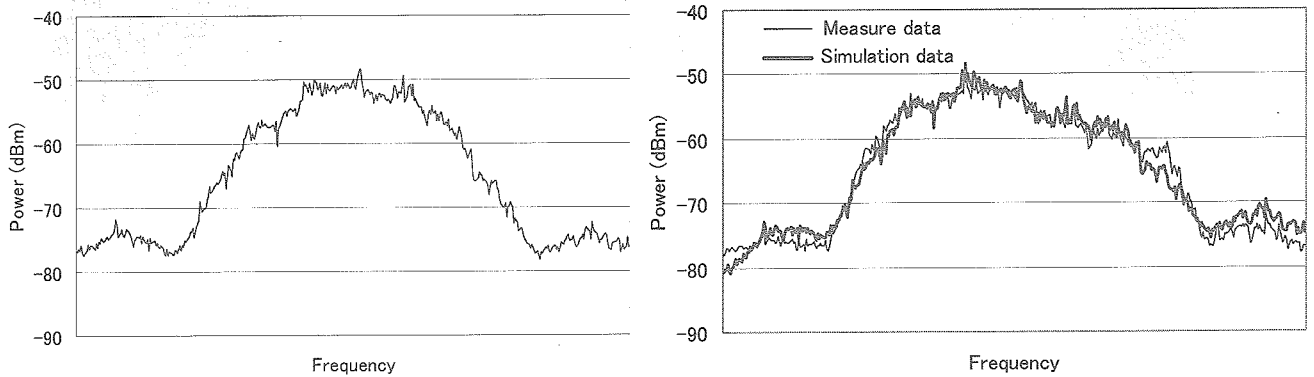


Fig. 5 $|B(j\omega)|^2$ waveforms

Fig. 5(a)から、 τ の値が大きくなるにつれ $|B(j\omega)|^2$ の波形は波を打つようになり、Fig. 5 (b)から、 τ の値が8.105 GHzの周期0.123 nsと比較して十分大きいときには、 τ の微小変動でも $|B(j\omega)|^2$ の波形変動が大きいことがわかる。この $|B(j\omega)|^2$ を用いて、正常時（反射波の電力が小さく、無視可能）の変調波を直接波とみなし、 a と τ の値を変化させてRev. 350時の画像データのライン欠損時のスペクトラム波形と重ね合わせるようにシミュレーションを行った結果をFig. 6に示す。観測波形とシミュレーション波形が良く一致することがわかる。



(a) Normal (b) In case of image line loss
Fig. 6 Comparison between measured QPSK spectrum and simulation spectrum

次に、受信レベルが短周期変動することについてであるが、多くの運用パスで、かつ、鳩山受信局以外の地上局でも観測され、ロックオフとの関連も確認されている (Fig. 7 参照)。

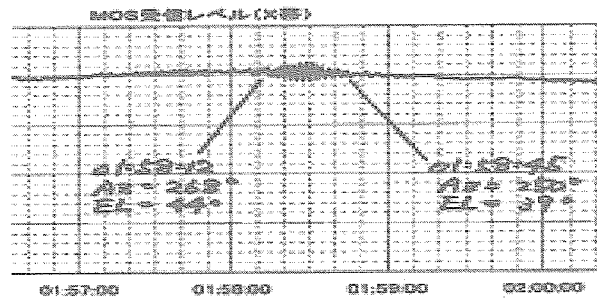
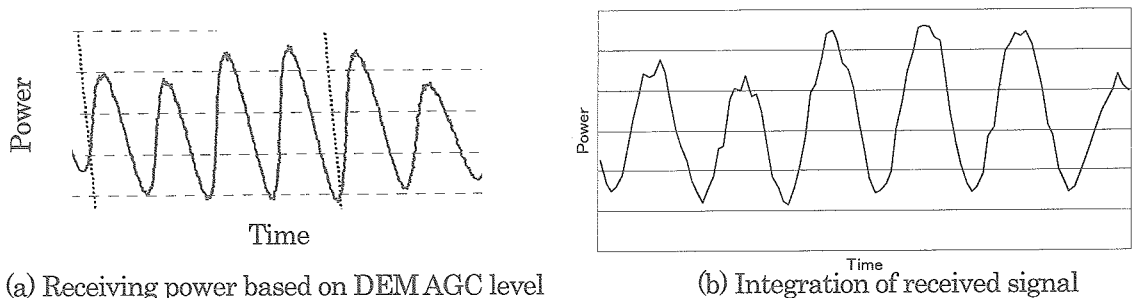


Fig. 7 Receiving power level fluctuation (Rev. 350)

この受信レベルの時間変動は、衛星の進行とともに地上局に到来する反射波の反射場所が移動することによる。短期的な受信レベル変動は、反射場所が移動すると、直接波と反射波の地上局への到来時間の差、すなわち式(1)の遅延時間 τ が変化することになり、結果として合成波のスペクトラムが変動し、この変動が受信レベルの変動として表れているのである。Rev. 350のロックオフ発生時の復調器のAGCから換算した受信レベルと、同時刻にスペアナで取得したスペクトラムを積分した信号レベルを比較した図をFig. 8に示す。受信レベル変動の時間間隔、変動幅が同一と考えられるため、受信レベル変動がスペクトラム変動によるものであることが証明できる。



(a) Receiving power based on DEM AGC level (b) Integration of received signal
Fig. 8 Receiving power level fluctuation at the demodulator lock off time

(3)再生搬送波、ビット同期、フレーム同期ロックオフの原因究明解析
搬送波再生回路が正常動作中に突然ロックオフする原因は2つ考えられる。

- (a) QPSK 変調信号レベルが雑音レベルと比較して小さくなる。
- (b) QPSK 変調信号の信号歪成分が大きくなる。

(a)については、例えば Rev. 350 時において受信レベルが AOS, LOS 時よりも大きいときにロックオフが発生していることから、原因ではない。したがって、(b)が原因であると推定される。この信号歪は、マルチパスによる反射波の存在により発生したと考えられる。

反射波が存在しない場合、復調器から出力される I,Qch のベースバンドデータは、それぞれ Fig. 9 (a)に示すように復調器に入力される変調信号のレベルが一定であればレベルに変動要因が無く、1 か -1 の値を取る。一方、反射波が存在する場合は、Fig. 9 (b)に示すように直接波と反射波の和である合成波はレベルが大きく変動する。

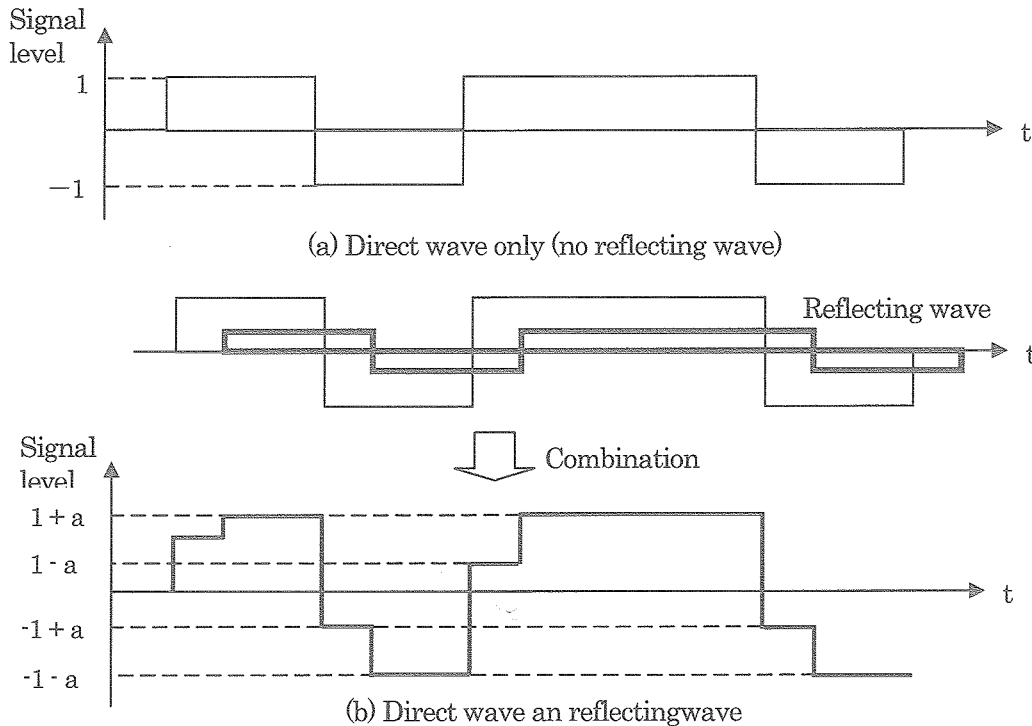


Fig. 9 Baseband data after QPSK demodulation

Fig. 9 (b)のグラフは、直接波と反射波の変調信号の搬送波位相が一致した場合を示しているが、実際にはそれぞれの搬送波の位相をベクトルで表すと、Fig. 10 に示すように遅延時間 τ の値が変動することによって合成波の位相のベクトル方向や信号レベルも変動する。この位相ベクトルの変動が、(1)で示した変調スペクトラムの変動を引き起こしているのである。

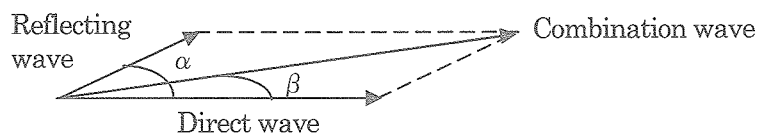


Fig. 10 Carrier phase vector concept

このときの搬送波再生回路の動作を考える。反射波成分は搬送波再生回路においては雑音として識別される。今回のロックオフ事象は受信レベルが大きいときに発生しているため、熱雑音は反射波の信号レベルよりも十分小さく、無視できることから、D/U と搬送波再生回路の S/N の関係を考えてみる。

搬送波再生回路の S/N が最小となるときの直接波と反射波の搬送波位相ベクトルの関係は、BPSK 変調信号であれば Fig. 10 の角度 α が 180 度のときである。直接波と反射波の搬送波が 180 度異なるため、同一符号のビットの信号成分が打ち消しあうことになるからである。しかし、QPSK 変調信号の場合は、反射波も QPSK 変調信号であることから、 α が 135 (= 180 - 45) 度または 225 (= 180 + 45) 度のとき、Fig. 11 に示すように反射波

の I_{ch} と Q_{ch} の合成成分の搬送波が I_{ch} または Q_{ch} の搬送波ベクトルと 180 度異なるため、信号成分が大きく打ち消しあう。したがって、搬送波再生回路の S/N が最小となるのは、 α が 135 度または 225 度である。

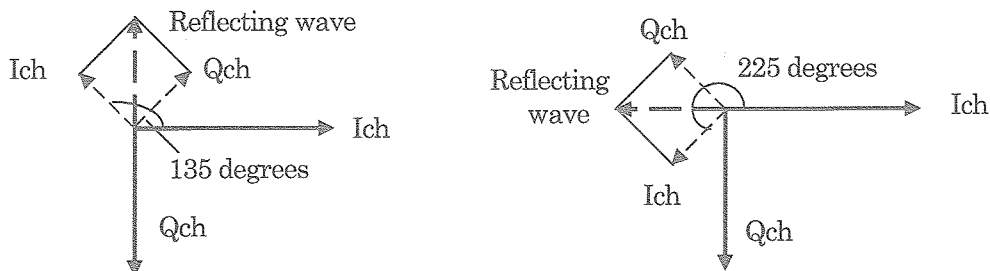


Fig. 11 Direct wave and reflecting wave phase vector in case of carrier recovery circuit minimum S/N

実際にロックオフが観測されたときの搬送波再生回路の最小 S/N を計算してみる。Fig. 6 (b)のときの反射波の振幅成分 a が 0.4 であるため、D/U は 8 dB である。直接波と反射波の搬送波位相の関係が Fig. 11 のとき、反射波の合成成分の振幅レベルは 0.57 となるため、このときの S/N は 4.9 dB となる。この S/N の値は非常に小さいため、Costas ループ制御が不安定となり、ロックオフに至ったと推定される。

以上から、ロックオフは以下の 2 つの事象が揃ったときに発生すると考えられる。

- (i) 信号レベルの大きい反射波が存在する
- (ii) 直接波と反射波の搬送波位相ベクトル角度差が大きい

次に、ビット同期ロックオフについて考える。Rev. 1094 において、QPSK 復調器がビット同期が外れたのにも係らず、リードソロモンでビット誤りを訂正できたという事象が発生した。本事象は、再生搬送波のロックオフは発生せず、ビット同期のみロックオフしたために発生したと考えられる。

ビット同期回路のブロック図を Fig. 12 に示す。現在のビットと 1 ビット前の信号の極性を判定することで、現在のタイミングの位相と受信信号の位相の間の進みや遅れの情報を得ることができる。この進みや遅れの情報を PLL など平均化し、フィードバックした結果よりビット同期を行う。

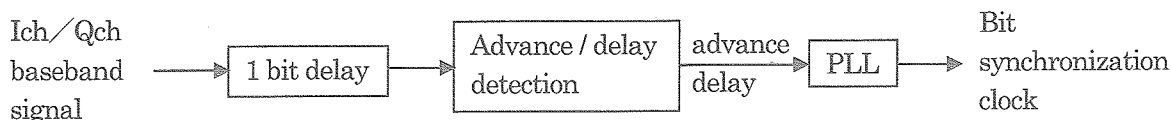


Fig. 12 Bit synchronization circuits block diagram

レベルの大きい反射波が存在する場合、合成波の信号レベルは Fig. 9 (b)のように表すことができる。また、遅延時間 τ が 8 ns とすると、1 ビット長が 14 ns (データレート 69.38 Mbps) であるため、ビットの中心付近で大きなレベル変動が発生していることになる。このレベル変動により進み/遅れ検出回路が誤動作し、ビット同期のロックオフに至ったと考えられる。観測データからもこのメカニズムを裏付けることが可能であるため、このロックオフメカニズムは妥当であるといえる

4. まとめ

だいち X バンド伝送ロックオフ調査・対策チームにおいて実施した不具合原因究明・対策検討の一環として、DT 伝送系における地上局 IF フィルタの評価解析、QPSK 変調スペクトラムと地上局 RF 信号受信レベルの時間変動の解析、再生搬送波、ビット同期、フレーム同期ロックオフの原因究明解析を実施した。再生搬送波ロックオフメカニズムについては、推定であることから、今後実験を行うことにより明確にしたいと考えている。

[参考文献]

- ・SSA-06002 ALOS X バンド伝送ロックオフ調査・対策報告書