

飛翔中のコマンド受信機の動作電波環境

矢島 信之*・太田 茂雄*

本田 秀之*・他気球グループ*

Operating Conditions of Tele-command Receiver during Balloon Flight

By

Nobuyuki YAJIMA*, Shigeo OHTA*,

Hideyuki HONDA* and Balloon Group*

Abstract: The revised model of the tele-command receiver for balloon use has an additional function that measures strength of a receiving signal. The data is transferred to the ground station by the telemetry. Through the several balloon flights, many interesting phenomena concerned with the operating conditions of the receiver have been observed as following.

(1) In case of a long distance flight, the interferometric effect caused by the radio wave reflected from the sea surface is quite large.

(2) When the balloon flies over near radio station, signal strength becomes very small by the different alignment and polarization between transmitting and receiving antennas.

(3) The jamming by external signals must not so serious according to a few examples.

Based on those observation results, the minimum receiving gain can be estimated to keep stable command transmission. A simple field test method is developed for the measurement of the receiving gain suppressed by the noise that comes from other on board instruments. The tentative results of this field test were satisfactory for the improvement of the reliability of the tele-command system.

概 要

現用のコマンド受信機モデルが旧型となり新しいモデルを開発した機会に、飛翔中の受信強度を出力しテレメータでモニタできる機能を付加した。この新しい機能により、いくつかの気球実験で飛翔中の受信強度が詳しく観測された。その結果、以下の事実が判明した。

(1) 海上を遠距離まで飛翔する場合、海面反射波との干渉による効果は大きく、受信マージンに影響すること。

(2) 地上通信局の真上近くを飛翔する場合、送・受アンテナの指向方向および偏波面の不一致による電界強度の低下が大きいこと。

(3) 外来電波と思われる信号は存在するが、観測された一例では、強度は弱く持続時間も短く、影響は小さいと思われること。

こうした、観測データにより、コマンド受信機が搭載機器からのノイズで抑圧を受ける場合の合理的な許容値を決めることができた。そこで、コマンドシステムが放球可能な性能を保持しているか否かを判定するために、放球場で抑圧量を簡便かつ正確に測定する方式を考案し実施したところ良好な結果を得た。観測された受信データから明らかになった上記3点とフィールド測定法を示し、コマンドシステムの信頼性の向上に寄与していることを述べる。

重要語：気球、遠隔コマンド、海面反射、電波干渉

1. はじめに

気球の飛翔を制御するコマンド受信機は、気球に搭載する共通搭載計器の中でも特に重要な装置である。通信範囲は、気球が水平線の下に隠れる約700kmまでと広く、通信時間も長い場合数日の飛翔期間を想定しなければならない。昼夜の温度差も大きいので、動作環境にも注意を払う必要がある。このため、コマンドシステムの機能維持には、放球を準備する段階で電波テスト等を慎重に行い、万全を期している。平成3年度からは、大型の気球にはすべて本来のコマンド受信機以外に、航空保安用コマンド受信機と呼ぶ気球カット操作のみを行う受信機を気球吊り紐の上部に取り付けている。気球の飛翔を終了する装置を2重系とすることで信頼性の向上を図ったものである。1) 地上局の送信機も2台の冗長構成として信頼性を向上させている。しかし、こうした注意にもかかわらず、小型コンピュータのような高速デジタル機器が多く搭載されるようになるとともに、そこから発生するノイズでコマンド受信機が抑圧を受け、遠距離で動作が不安定となるトラブルが増加してきている。また、逆に気球が送信局の上空を通過する際に動作が不安定となる場合や外来電波による感度抑圧と思われる現象も発生することもある。

ただし、そうした障害は、送信局の上空を通過する場合を除けば、電界強度は距離の2乗に反比例するとする単純な理論式から導かれる受信強度を前提にすると、よほど強い雑音成分がなければ説明がつかない。他方、事前の動作テストでは、そのような強力なノイズは想定しがたく、合理的解釈に困ることが多かった。そこで、気球が飛翔している間、コマンド受信機は実際にどのような状態で動作しているかを把握し、動作不良の要因を明らかにする必要に迫られていた。

今回、コマンド受信機を新規に設計・製作することになった機会に、2) 標準機能として受信感度の情報を出力させる機能を付加し、常時テレメータで地上に伝送できるようにした。その結果、いくつかの気球実験で、飛翔している間の受信強度の変化が詳しく観測できた。本論文では、それらの観測データ解析から明らかになった以下の3点について報告する。

- (1) 気球が海面上を遠距離まで飛翔した場合の海面反射波との干渉の影響。
- (2) 送信基地の上空を通過する場合に受信強度が著しく低下する特異点の影響。
- (3) 外乱電波の強度とその影響。

飛翔中のコマンド受信機の動作環境がかなり明らかにできたので、外来ノイズによって生じる受信感度の低下がどの程度のレベル以下でなければならないかを数量的に設定できるようになった。そこで、放球前にコマンド受信機の動作感度を正確に測定できれば、飛翔実験に用いて問題ないか否かを数量的に確認することが可能となるはずである。測定は、気球が飛翔している状態に近い状態で行うことが望ましい。そこで、放球フィールドにゴンドラを設置して測定する簡便な方法を考案して適用したところ、非常に有効であった。この測定方式についても併せて報告する。

2. コマンドシステムの概要

2.1. 地上局送信設備

三陸大気球観測所に付設するコマンド地上局は、放球場から4km離れた標高834mの山頂にあり、送信アンテナは13mのタワー上に取付けられている。アンテナは5素子の八木アンテナであって、偏波面は垂直、利得は11dBである。アンテナの指向方向は方位角のみ気球の方向に向けるが、仰角方向は制御せず水平方向に固定している。送信機の出力は25W、周波数は72.3MHz、変調方式はFM変調である。

2.2. 搭載受信機

気球に搭載するコマンド受信機の受信アンテナは、同軸フィーダの外側のメッシュ電線を折り返した半波長ダイポールアンテナで、通常はゴンドラから下方につり下げて使用している。偏波面は垂直偏波であり、利得は3dB程度である。

受信機の感度としては、定格感度は $-2\text{dB}\mu$ (-116dBm)、FMノイズを20dB抑圧してほぼ完全なFM通信が確保されるレベルは $7\text{dB}\mu$ (-107dBm)である。オーディオトーン信号として送られるコマンドは狭帯域フィルタで弁別するのでノイズの中から抽出する能力は高く、コマンド動作限界は定格感度より高い $-6\text{dB}\mu$ (-120dBm)である。

コマンド受信機が備えている受信強度を出力する機能は、受信状態の簡単なモニタを目的としたもので、測定のダイナミックレンジは2桁半程度である。その特性曲線を図1に示す。外来雑音の影響の観測など、弱い電界強度の測定を主目的としたため $40\text{dB}\mu$ (-75dBm)以上の強い電界強度では出力は飽和している。温度ドリフトもかなり大きい。それでも、後述するように今回明らかにできた諸現象を解明するには十分な性能である。

2.3. 電界強度と受信マージン

2.3.1. 計算上の電界強度

送信アンテナから直線距離 L (km)離れた見通し範囲の電界強度 E ($\text{dB}\mu$)は、周知のように、

$$E = 10 \cdot \text{Log } P + 20 \cdot (\text{Log } G_1 + \text{Log } G_2 - \text{Log } L - \text{Log } A) \quad (1)$$

である。ここで、 P は送信電力、 G_1 、 G_2 は送・受信アンテナのゲイン、 A は給電線その他の損失である。上式に、2.1.記載の数値を入れ、給電線損失等を -10dB 程度とすると、直線距離に対する受信アンテナ端での電界強度は図2のように斜線を引いた範囲となる。

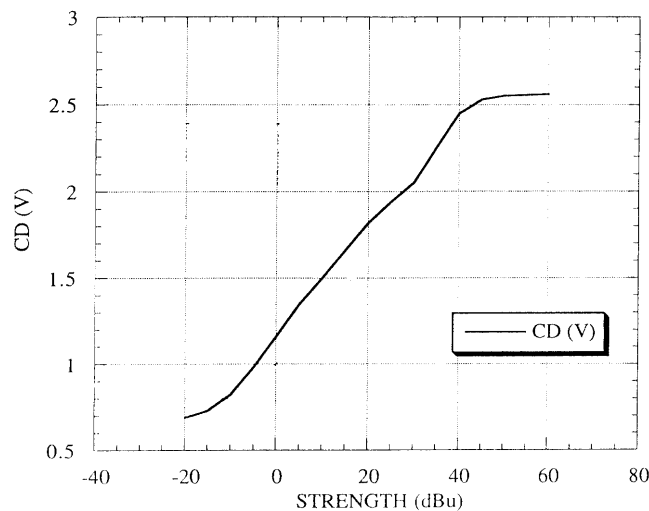


図1. コマンド受信機の受信強度検出特性

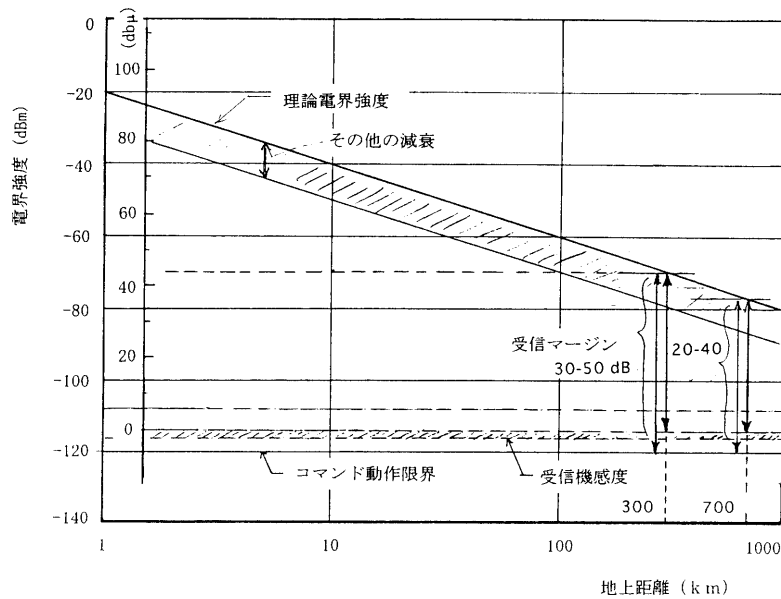


図2. 海面反射による効果を考えない計算上の電界強度

2.3.2. 受信マージン

この電界強度のもとでは、最高感度 $-6\text{dB}\mu$ (-120dBm) 定格感度 $-2\text{dB}\mu$ (-116dBm) の受信感度を持つ受信機では、700km以上離れた受信限界でも少なくとも20から40dB以上のマージンがあり、ノイズのない正常な通信が問題なく成立するはずである。こうした条件下で、もし内部機器の雑音により妨害を受けるとすれば、地上での動作テストでその影響はもっと強く現われてよいはずであり、これも現実の地上テスト時の状況とはかなり異なる。総合的に考え、正常値より20dB以上受信強度が低下していなければコマンド信号の伝送が妨害を受けるとは考え難いことになっていた。

3. 実験結果

3.1. 海面反射波との干渉

海上を遠距離まで飛翔した気球から送られた受信強度のデータより、海面反射波によると思われる電界強度の大きな変動が観測された。こうした現象はテレメータ信号で観測されたことはあったが、3) コマンド用の電波では初めて定量的に観測され、影響の大きさが確認できた。

観測データは1995年5月30日に打ち上げたB1-36気球で取得された。この気球は新しいコマンド受信機が受信限界まで正しく動作するか否かを確認することを主な目的として、動作環境の厳しい夜間にジェット気流の上縁である高度16km~19kmを東に向かって飛翔させた。その航跡図を図3に、気球の高度変化を図4に示す。最終位置は基地から560kmの地点であって、この距離は高度35kmの場合では700km以上に相当し、通常は受信の限界に近いとして飛翔を終了する所である。途中で高度が変化しているのは、風速の違いを利用して東方へ飛翔する速度を調整したためである。

3.1.1. 電界強度観測結果

図5に観測された電界強度のデータを示す。横軸は地上局から気球までの直線距離、縦軸は電界強度である。図中の太い実線は2.1節で述べた理論電界強度である。電波はコマンド信号を送る時と測距を行う時しか送信していないため、その時点の約5秒間だけ点状に受信レベルが上昇し、それ以外ではコマンド電波の受信はないので雑音レベルを示している。雑音レベルが時間とともに僅かに増加しているのは、温度ドリフトである。先に述べたように、電界強度のデータは $40\text{dB}\mu$ (-75dBm) 以上では飽和している。測定データを見ると、300kmあ

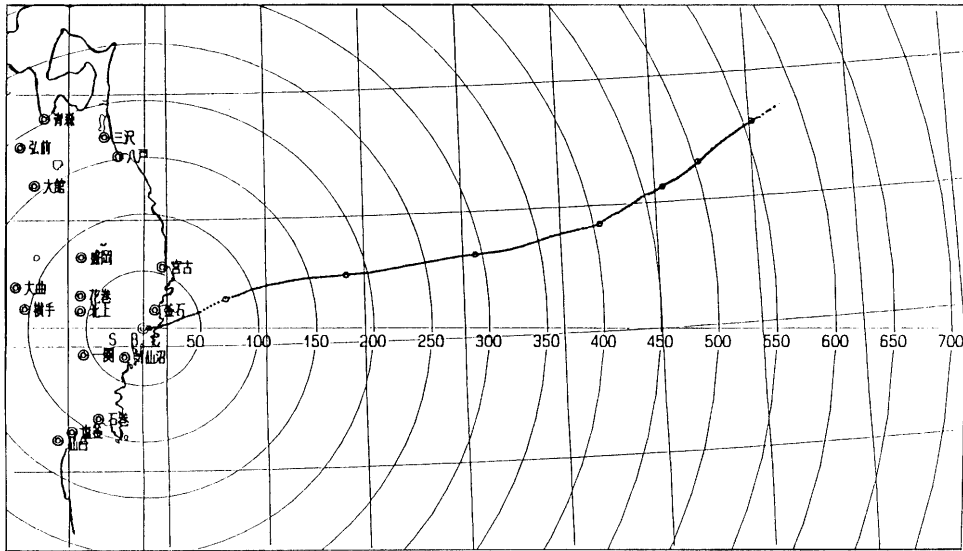


図3. 電界強度を測定した気球の航跡

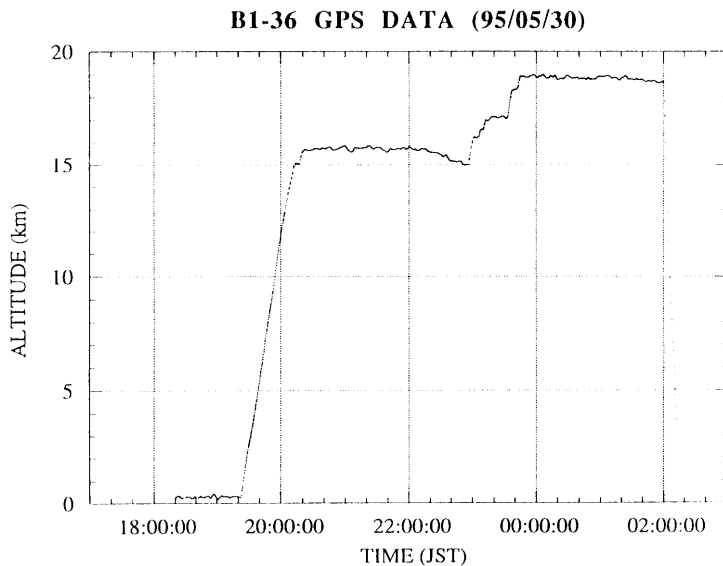


図4. 気球の高度変化

たりから周期的な受信レベルの低下が現れはじめ、距離の増大とともに周期と減衰量が增大している。400 km あたりからはレベルの変動パターンは著しくなり、500 km 付近では変動周期が 30 km となり、減衰量はおおよそ 15 から 20 dB となっている。

3. 1. 2. 海面反射による干渉のモデル

図5に示した電界強度データの規則的変動は気球までの直進波と海面反射波との干渉により発生していると想定できる。そこで、確認のため干渉パターンを計算で求め観測値と照合してみる。直進波と海面反射波との干渉モデルは図6に示すような幾何学的関係となる。実際には、電波は大気中を屈折して進むが、地球の半径に一定倍率 (4/3) を掛けて補正することで図のように直進するものとして扱える。地芯から海面までの距離 (補正地球半径) を R_1 、同じく送信アンテナまでの距離を R_2 、気球までの距離を R_3 とし、角度 θ_1 から θ_4 を図中に示すように決めると、送信アンテナから海面反射点までの距離 L_1 、反射点から気球までの距離 L_2 、送信アンテナから気

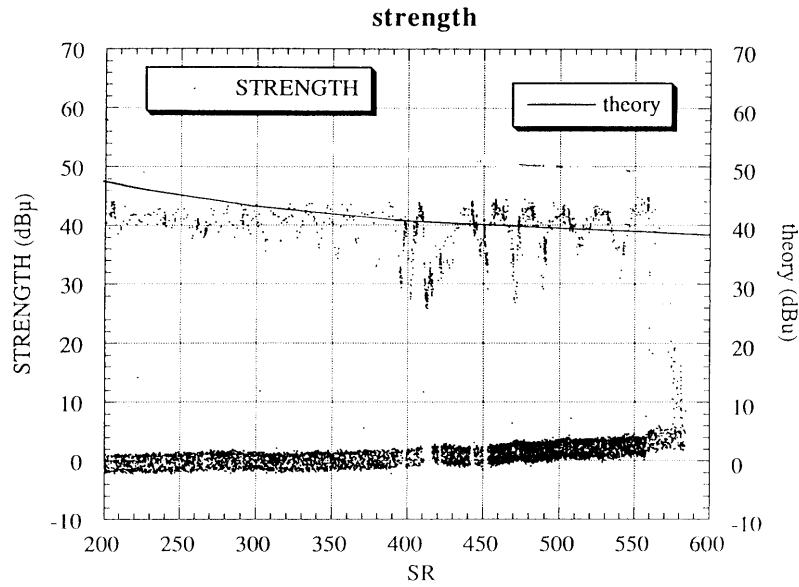


図5. 受信電界強度の観測データ

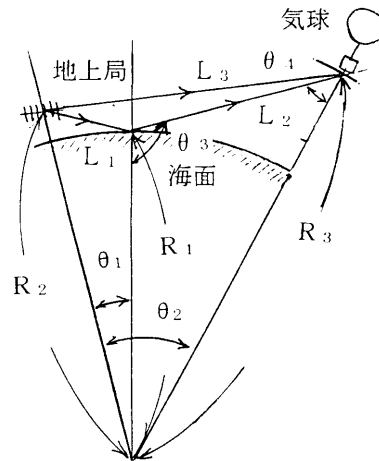


図6. 直進波と海上反射波の干渉モデル

球までの距離 L_3 は以下のように求まる。

$$L_1 = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2 * R_1 * R_2 * \cos \theta_1} \quad (2)$$

$$L_2 = L_1 * R_3 * \sin \theta_3 / (R_2 * \sin \theta_1) \quad (3)$$

$$L_3 = \sqrt{L_1^2 + L_2^2 - 2 * L_1 * L_2 * \cos (2 * (\pi - \theta_3))} \quad (4)$$

ここで、

$$\theta_3 = \sin^{-1}(R_2 * L_1^{-1} * \sin \theta_1) \quad (5)$$

$$\theta_4 = \sin^{-1}(R_1 * R_2 * (R_3 * L_1)^{-1} * \sin \theta_1) \quad (6)$$

$$\theta_2 = \pi - \theta_3 - \theta_4 \quad (7)$$

である。電波の2つの伝搬ルートの差 ΔL は、 $\Delta L = L_3 - L_2 - L_1$ であるから、波長 λ の電波の位相差 ϕ は、 $\phi = 2\pi(\Delta L/\lambda) + \alpha$ となる。ここで、 α は海面を反射する時の入射波と反射波との間の位相ずれである。直進波を \sin

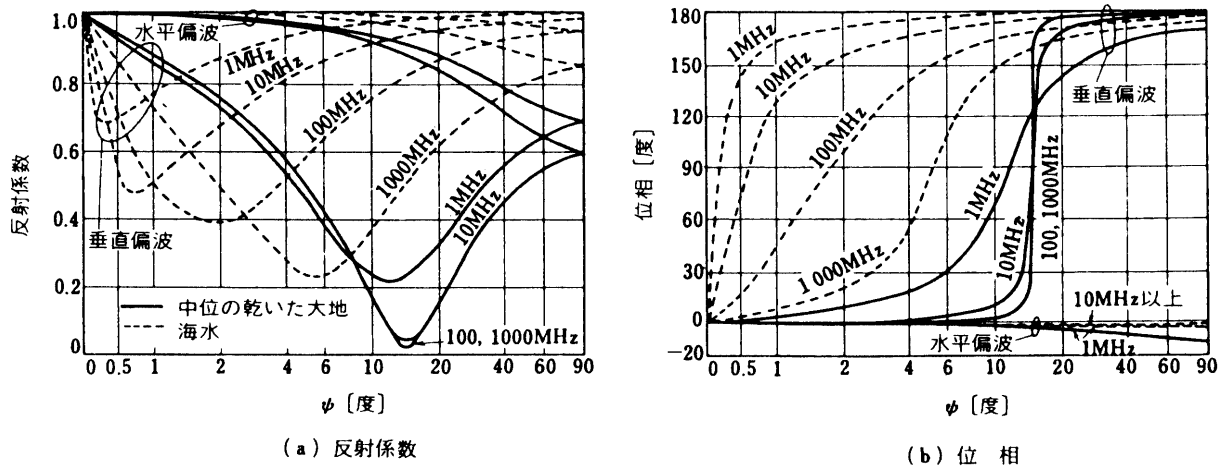


図7. 電波の反射角と反射率および位相変化の関係
(電子情報通信ハンドブック, 1988年版より)

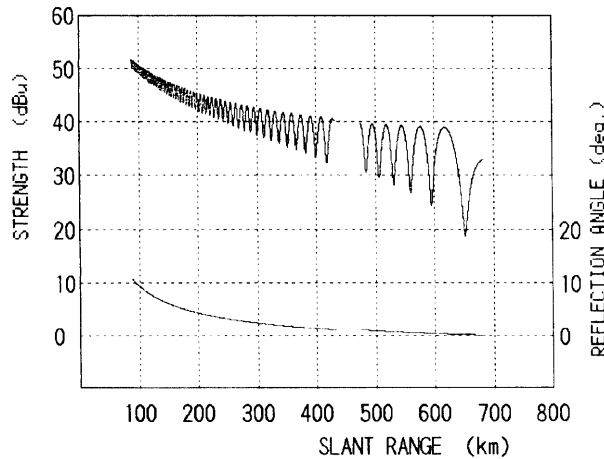


図8. 干渉モデルにもとづく電界強度パターンの計算結果

ωt とすると、反射波は海面反射率を K_r としたとき $K_r \sin(\omega t + \phi)$ であるので、2つの電波の和の振幅 A が受信レベルであって、

$$A = \sqrt{1 + 2 \cdot K_r \cdot \cos \phi + K_r^2}$$

$$= \sqrt{1 + 2 \cdot K_r \cdot \cos (2\pi\Delta L/\lambda + \alpha) + K_r^2} \quad (8)$$

となる。送信アンテナと海面反射点とのなす θ_1 をパラメータにして ΔL を求め、干渉波の振幅 A の変化を導くと、干渉パターンを得ることができる。反射率 K_r と位相ずれ角 α は図7に示す電気通信ハンドブック記載のデータを参考にした。4) 反射時の位相ずれはほぼ反射角に比例し、垂直偏波の反射率は最低を示すブリースター角(70MHzでは1.5度程度)より小さい角度では急速に反射率1に近づく。

上記の式に、コマンド電波の波長を4.2mとし、気球の飛行高度は実際の飛行と同様に、当初は16kmで飛行し、直線距離430kmから440kmの間で19kmに上昇させた経緯を適用する。この条件のもとで直線距離300kmからの干渉パターンを計算すると、結果は図8のようになる。この図は得られた観測結果(図5)と良く一致しているので、この受信レベルの周期的変動は海面反射による干渉の影響と結論してよいと考えられる。

干渉による最大減衰量 Ea は K_r のみで決まり、

$$Ea = 20 \cdot \text{Log} \left\{ \frac{1 + K_r}{1 - K_r} \right\} \quad (9)$$

であり、 $K_r = 0.5$ で 9.5dB, 0.7 で 15dB, 0.9 で 25dB となる。観測結果からも 10~15dB の減衰があると読み取れる。この結果から、受信機の受信感度上のマージンは、受信限界距離ではせいぜい 10 から 20dB 程度しか残らず、搭載装置からのノイズでそれ以上の抑圧を受けている場合は、コマンド信号の受信に障害を起こす恐れがある。そこで、実用的には、安全性を考慮して感度低下は 10dB 以内に押さえるのが妥当であると考えられる。

ところで、海面反射点までの直線距離の最大値 $L_{1, \max}$ は、

$$L_{1, \max} = \sqrt{R_2^2 - R_1^2} \quad (10)$$

である。送信アンテナの標高が 833m であるから、 $L_{1, \max}$ は 103km となる。すなわち、送信アンテナからこの距離まで海上でなければ、このように顕著な海面反射による干渉は発生しないであろう。すなわち、三陸大気球観測所の立地が太平洋岸から数 km であることが、東の海上を進む気球でこうした干渉の効果を大きくしているのである。

3.2. 送信局の天頂付近を通過する場合の特異点

3.2.1. アンテナビームパターンと受信強度

コマンド用送信アンテナは、仰角を制御していないため、気球が地上基地の上空を通過する時は完全にアンテナの主ビームから外れる。しかし距離が近いため、サイドビームなどの漏れ電波により通信が確保されるであろうと想定されていた。とくに、ごくまれに天頂を通過した場合でも通信が途切れたことがなかったため、経験上問題はなかろうとされていた。しかし、気球が送信アンテナの真上に接近するにつれて受信状態が悪化する場合があります。やはりビームを外れる影響ではないかと疑われた。この位置は、観測器を三陸沖で回収する気球では、飛翔を終了するためのコマンドを送出する場所に当たることもあり、動作の不安定は特に好ましくない。

3.2.2. 観測データ

1995年8月に放球した B5-134 気球は、図9に示すように、たまたま高度 28km で三陸沖から三陸大気球観測所に接近したため、徐々に仰角が増大する場合の受信強度を詳しく観測することができた。以後他にも、地上受信局の近くを通過した時に、受信状態が不安定となり、測距の測定数値が変動した例も得られている。

図10に気球が飛翔中の受信強度の変化を示す。気球までの仰角が62度角より大きくなるとともに、受信レベルが急速に低下し、受信状態が不安定になっていることがわかる。この場合、送信アンテナの真上を通過する前

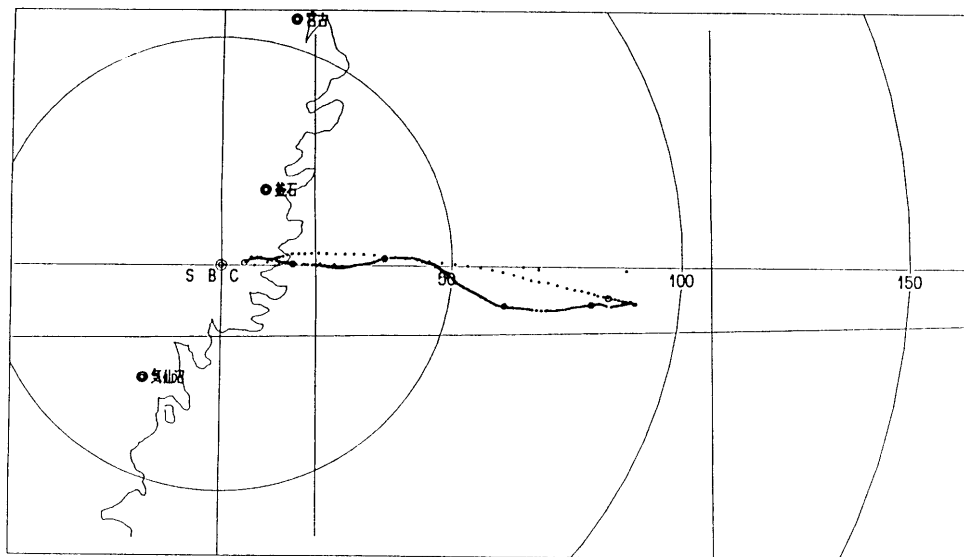


図9. 気球基地上空を飛翔した気球の航跡図

に飛翔を終了しているので確定的ではないが、最も受信強度が低下するのは予想に反し仰角が70度付近であり、それより仰角が大きくなると受信強度が再び増大している。この状態が続くとすれば、天頂通過時には通信が確保されているとするこれまでの経験を裏付けるものとなる。

受信強度が急速に低下する領域では、電波はアンテナのサイドローブ、地上からの反射波およびそれらの干渉波等が混ざり合い複雑な状態となっていると考えられ、受信強度は極めて不安定に変動している。最低感度の所では20dB μ 程度にまで低下している。

こうした受信状態を考慮すると、無線局の上空を通過する場合にも、遠距離と同様の受信マージンを確保する必要がある。

3.2.3. 対策

この現象に対する対策は、理想的にはアンテナのビーム方向と偏波面の両方を常に一致させることであるが、受信アンテナを現状の簡単な垂直ダイポールアンテナから変えることは望ましくない。送信アンテナについても仰角を変える等の複雑な機構は好ましくない。現実的には、この問題はたまたま気球が天頂付近を通過する僅かな機会と範囲で発生するだけである。気球までの距離もほぼ飛翔高度であるので、たかだか50kmである。そこで、広い幅を持つ主ビームを天頂に向けて放射すれば偏波面が違っていても十分受信可能なはずである。たとえば、天頂を中心に半球状のビームを持つクロス・ダイポールアンテナを固定しておき、気球が接近したならば八木アンテナから切り換えて使えば十分目的をはたすはずである。

4. 外来電波の強度と影響

これまでも、気球が飛翔している間、コマンド受信機のオーディオ出力をテレメータ回線を使って地上局に返送しモニターしている際に、時折音声ないしは音楽のような信号が入感する場合があった。信号の持続時間は長くて数分間、途切れ途切れで内容は不明瞭である。電波の強度はさほど強くないようであるが、場合によってはコマンド通信の妨害にならないかと懸念された。気球は通常30km以上の高い高度を飛ぶため、一般の地上通信より見通し範囲が広く、その分だけ強力な電波のスプリアスや違法電波の混信を受けやすいと考えられる。

図10に示したB5-134気球の飛翔中の受信強度データの中に、たまたま外来電波によると思われる強度の変化が現われている。図の中で、仰角15度から30度の間で時々受信レベルが盛り上がっている部分がそれと思わ

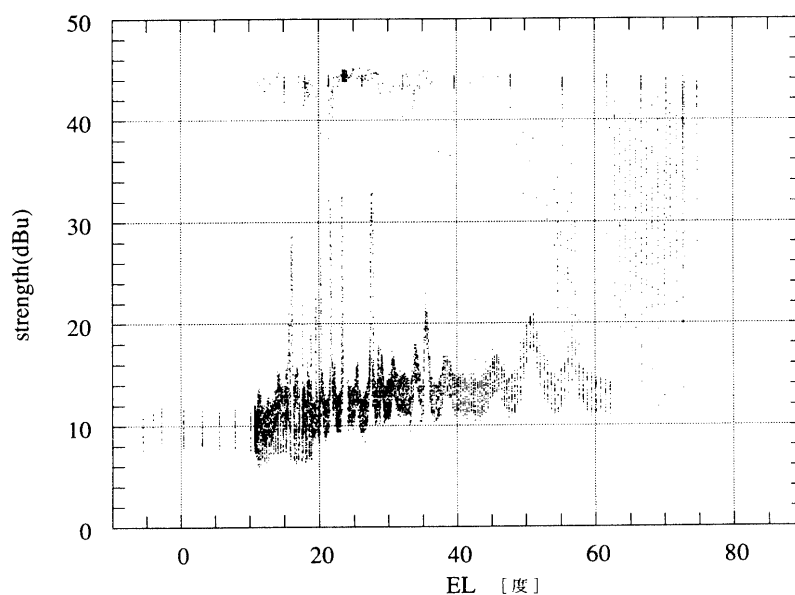


図10. 地上基地から気球までの仰角と受信強度の観測データ

れる。この場合、気球の飛翔位置は三陸沖合 50km 程であった。受信レベルは 30dB μ 前後であって、さほど強力ではない。持続時間も 1 分以内である。この距離でのコマンド電波の強度は、図 2 より 50dB μ 程度であるので、今後実測例を増さないと結論できないが、電波の強度がこの程度であれば、仮にコマンドが妨害を受けたとしてもそれほど大きな影響はないと考えられる。

5. 雑音による抑圧レベルのフィールド測定

5.1. 測定方式

上記のように、飛翔中のコマンド受信機を受信強度がかなり明らかになったので、コマンド受信機が許容できる外部雑音による抑圧レベルを合理的に定めることができることとなった。残る問題は、コマンド受信機が他の搭載装置から発生するノイズで抑圧を受けているレベルをフライト前に数量的に正確に測定し、フライトに適するか否かを判定する方法である。その方法は、実際のフライトに近い状態で測定できることが望ましいことは言うまでもない。測定の精度は、1dB 程度で十分である。気球実験の実状から考えれば、その最終テストは気球基地で全ての搭載装置の組み込みが終わり、飛翔前の総合動作テストが行われる段階で短時間に行えるとよい。そこで、現地で簡単な装置を用い容易に測定できる簡便なフィールド測定法を考案した。図 11 にその構成図を示す。観測装置は、周囲に障害物のない放球場の中央に置かれ、本館屋上に取り付けた無指向性アンテナよりコマンド電波を送信する。両者の距離は 50m 程度である。送信機は本来のものではなく、標準信号発生器により微弱電波を送出する。その出力レベルは、内蔵のアッテネータで任意に変更できる。

測定方法は、まず観測装置側でコマンド受信機以外の全ての搭載装置の電源をオフとする。その状態で標準信号発生器の出力アッテネータを調整して送信電波の強度を変え、コマンド指令が受信できたか否かを観測器側で確認して、最低動作レベルをアッテネータのデシベル値で読み取っておく。次に、搭載装置の電源を投入し、同様にコマンド指令が実行できる最低動作レベルを読み取る。両者の差が、搭載装置からのノイズによる感度抑圧量のデシベル表現となる。もし、搭載機器の電源を個別に投入すれば、各々の機器の影響を独立に調べることも可能であるので、ノイズの発生源を突き止めて対策を立てる場合にも役立つ。

上記動作テストが実際のフライト状態と異なる点は、コマンドアンテナの位置、および周囲からの反射電波の影響である。しかし、アンテナを上向きに持ち上げて測定すれば、その位置が多少変化しても測定値にはほとんどばらつきがなく、アッテネータの最小目盛りである 1dB 単位で動作の分解能が得られており、再現性も良い。こうしたことから、フライト状態をほぼ模擬したテストになっていると考えられる。

5.2. 測定実施結果

これまで約 3 年間、この方式で延べ約 20 機の気球について受信抑圧量を測定してきたが、結果は極めて良好で

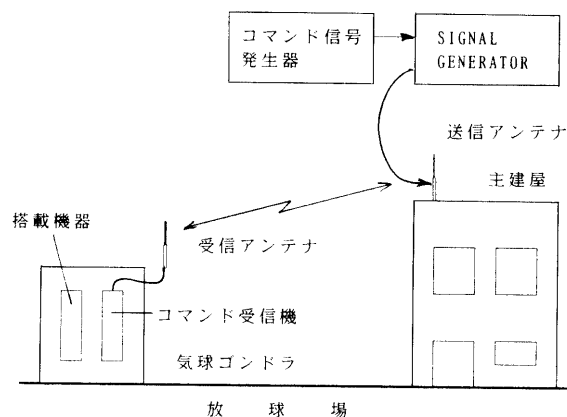


図 11. コマンド受信機のノイズ抑圧量のフィールド測定法

あった。受信機が抑圧を受ける原因としては、やはり観測器に小型コンピュータが組み込まれていて、そこから外部に接続されているケーブルにコンピュータからのノイズが漏れだしている場合が多かった。効果的な対策は、外部機器と接続するコネクタに電磁干渉対策品、すなわちノイズフィルタが組み込まれているものを使用することである。しかし、そうした対策に見落としがあったり、影響を過小評価して十分な対策を立てない場合は、容易に 20dB 以上の抑圧を受けている場合があった。また、コンピュータを搭載していなくても、ロジック IC に高速 CMOS を用いた場合にも、立ち上がりのパルス波形が鋭いためクロックパルスから多くの高調波分が発生し、コマンド受信機へのノイズとなる場合があることもわかった。一度外部にノイズが漏れだすと、ケーブルをシールドする等の対策ではノイズを減らすことは難しい。ノイズを閉じ込めるしっかりした筐体を用い、ノイズをそこから出さないことが肝要である。

6. ま と め

新しいモデルのコマンド受信機を開発した機会に、受信強度を出力させる機能を付加し、その信号をテレメータで地上局に送り、常時モニタできるようにした。いくつかの気球の実験で得られたデータから、飛翔中のコマンドの動作環境が以下のようにかなり詳しく明らかにできた。

- (1) 500km 以上の遠距離の海上を飛翔する場合には、海面反射波との干渉の影響が大きくなり、10 から 15 dB の減衰を考えねばならない。
- (2) 送信アンテナの真上近くを通る場合は、アンテナの主ビームを外れるため、電界強度が弱くなる。著しく不安定となるのは仰角 70 度付近で、電界強度は 20 dB 程度にまで低下する。
- (3) 妨害電波の観測は一例だけであるが、その限りではレベルは低く、持続時間も短く、影響は少ない。

上記の観測結果から総合的に考え、受信機の搭載機器から発生するノイズによる抑圧は、10dB 程度が許容できる上限と考えられることになった。

次に、この許容範囲を満たしているか否かを気球の放球前に確かかつ簡便に測定する方式を考案し、実際に気球実験に適用した。その結果は満足すべきもので、受信機の抑圧レベルが飛翔に耐える許容範囲にあるか否かを確実に測定できている。抑圧レベルが大きかった場合の対策等を通じ、ノイズの発生原因の究明法とその対策技術も取得され、コマンドシステム全体にたいする信頼性はこの間の経験を通じ大きく向上した。今後実測データが増えれば、さらに信頼性の向上を図ることができると考える。

参 考 文 献

- [1] 矢島信之, 山上隆正, 太田茂雄, 本田秀之, 長尾和男, 川瀬克行: 気球切離しコマンド機能の二重化, 宇宙研報告, 特集第 31 号, pp. 3-22, 1993 年 3 月.
- [2] 矢島信之, 太田茂雄, 本田秀之, 井筒直樹: 新しいコマンドシステムについて, 本報告掲載, 1998 年.
- [3] 西村 純, 廣澤春任, 太田茂雄, 秋山弘光, 藤井正美, 山上隆正, 粕 豊, 並木道義, 岡部選司, 松坂幸彦: リレー気球, 東大宇宙研報告, 第 16 巻, 第 2 号 (B), pp. 974-994, 1980 年 7 月.
- [4] 電子情報通信ハンドブック, 第一分冊, pp. 1300, 1988 年.