

テレメーター・テレコントロールの 高度利用に関する調査検討会

＜中間報告 参考資料＞

平成27年11月12日



総務省 北海道総合通信局

参考資料 （机上検討・ラボ試験）

- 1－1. 各種変調方式の検討 <机上検討>
- 1－2. 帯域幅毎の特性検討 <机上検討・ラボ試験>
- 1－3. 伝搬環境を模擬した検討 <机上検討・ラボ試験>
- 1－4. 静止画・動画伝送の検討 <ラボ試験>

【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

(1)周波数利用効率 ・各変調方式の伝送レート算出

①各変調方式の伝送レート算出

■ 検討内容

各変調方式において、帯域幅に対する伝送レートの理論的上限を算出した。

■ 検討結果

各一次変調方式における理論周波数利用効率より、チャンネル帯域幅に対する伝送レートの理論的上限を算出した。

<各変調方式のチャンネル帯域幅に対する伝送レートの理論的上限值>

変調方式	理論周波数利用効率 [bps/Hz]	伝送レートの理論的上限 [kbps]		
		帯域幅 100kHz	帯域幅 200kHz	帯域幅 300kHz
4値FSK	0.5	50	100	150
QPSK	2	200	400	600
16QAM	4	400	800	1200

【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

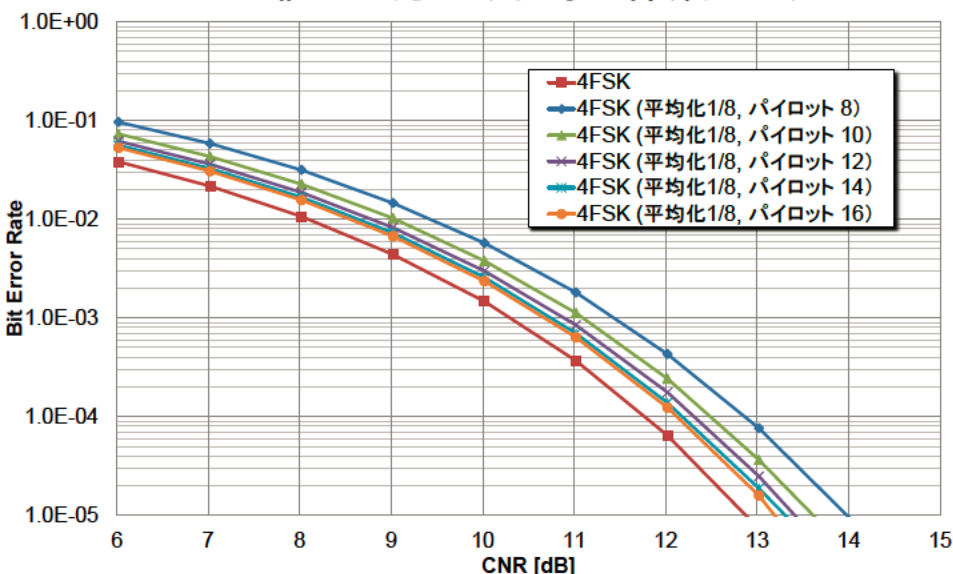
※参考 ・・固定パイロットシンボルの挿入方法について

各変調方式において、フレーム内に固定パイロットシンボルを挿入しIIR型平均化を適用した伝送路推定を行った場合のビット誤り率特性の計算機シミュレーションを行った。(今回の検討では無線局の移動速度を比較的低速としており、1/8より大きな平均化係数は対象外とし、固定パイロットブロック数=16前後を基準として計算)

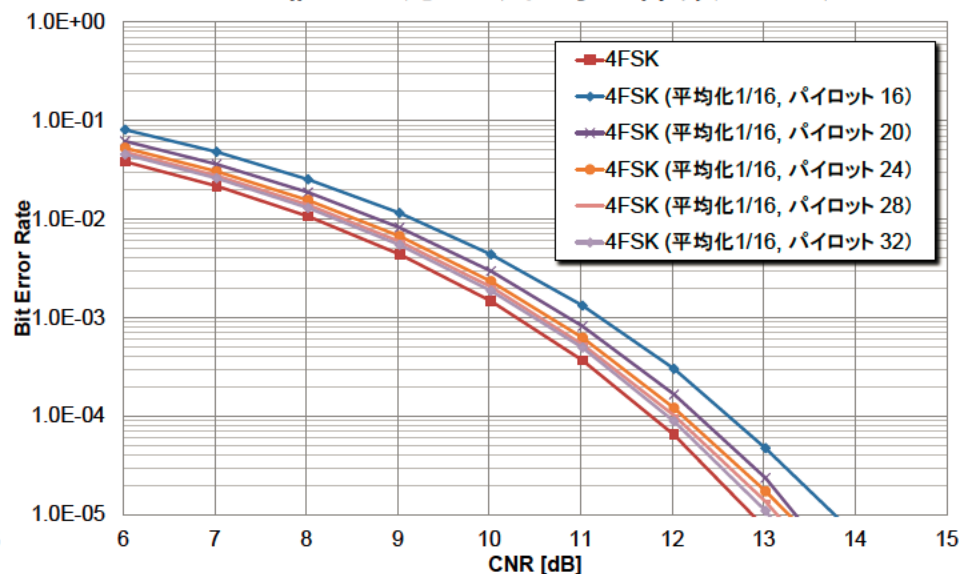
シミュレーション結果より、平均化係数を小さく設定すると理想性能からの劣化量を小さく抑えられるが、収束するために必要な固定パイロットブロック数が多く必要となる傾向が確認できる。

<4値FSK方式のビット誤り率特性>

4値FSK方式(平均化係数 1/8)



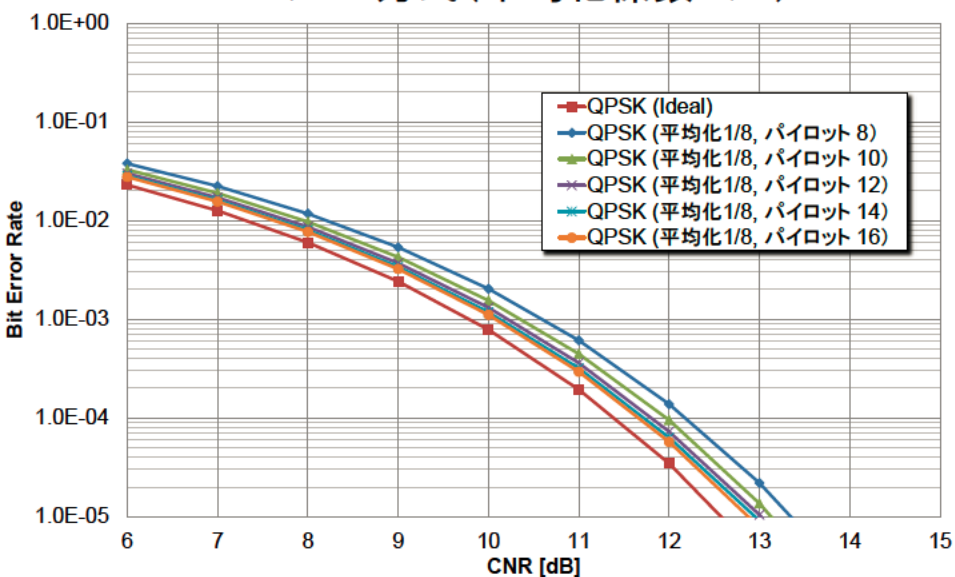
4値FSK方式(平均化係数 1/16)



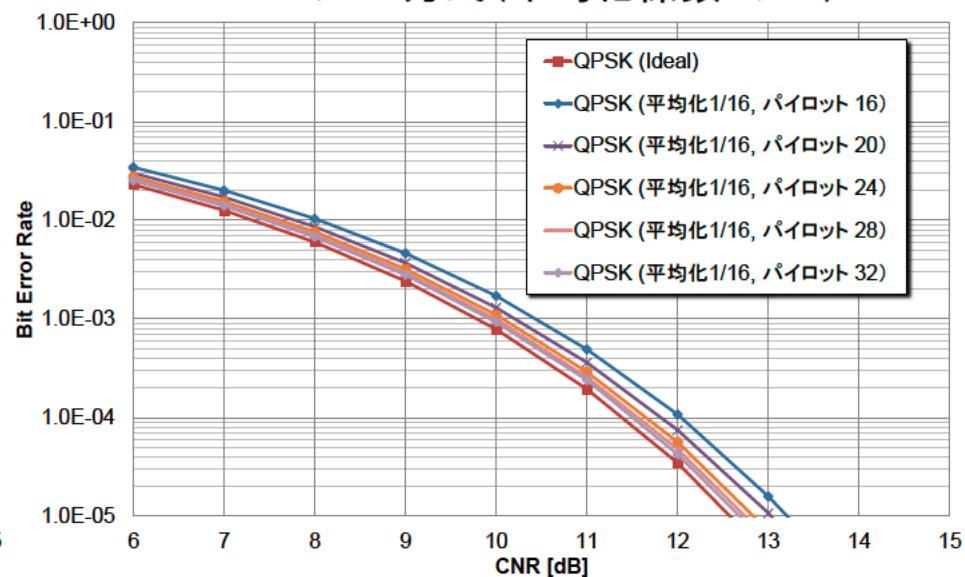
【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

<QPSK方式のビット誤り率特性>

QPSK方式(平均化係数 1/8)



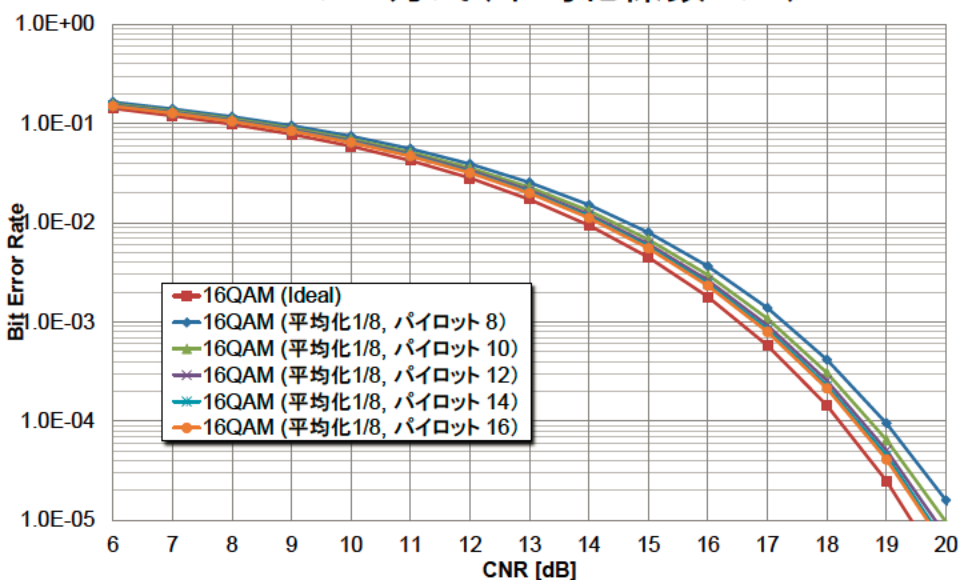
QPSK方式(平均化係数 1/16)



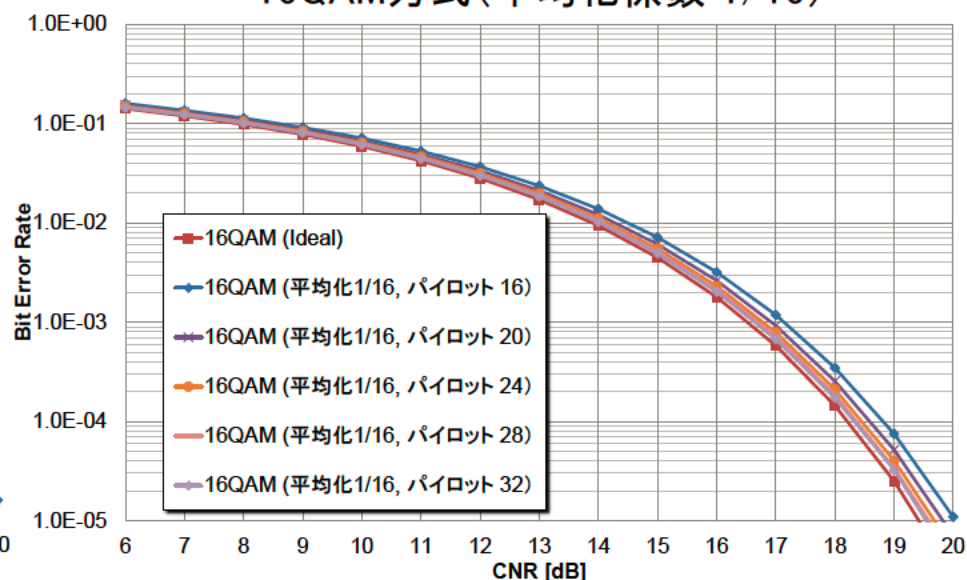
【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

<16QAM方式のビット誤り率特性>

16QAM方式(平均化係数 1/8)



16QAM方式(平均化係数 1/16)



【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

(2)長距離通信 ・・各変調方式のベースバンド信号波形の位相遷移をPAPRの観点で比較

■ 検討内容

長距離通信を簡易な無線装置で実現可能な変調方式を選定するため、デジタル変調方式として代表的な4値FSK方式、QPSK方式、16QAM方式を候補とし、計算機シミュレーションにて各方式のベースバンド信号波形に関する位相遷移をPAPR(Peak to Average Power Ratio)の観点から比較検討した。

■ 検討結果

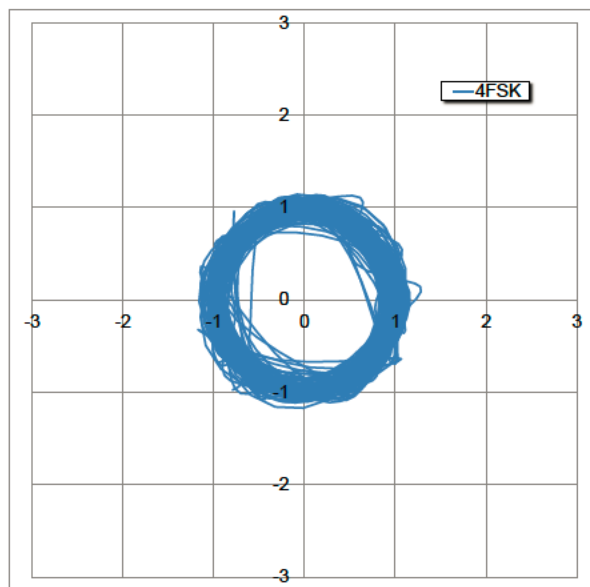
各変調方式におけるコンスタレーションを比較検討した結果、4値FSK方式は情報ビットに応じて周波数を変化させる変調方式であるため、信号位相は単位円上を回転する軌跡を描く。

一方、QPSK方式と16QAM方式は情報ビットが多値化されており、QPSK方式は2ビットの情報を位相の変化とし、16QAM方式では4ビットの情報を位相と振幅に割り当てる方式であるため、信号位相の軌跡が大きく変動する。特に16QAM方式は取り得る信号位相と振幅の組合せが多く、変動量が大い。

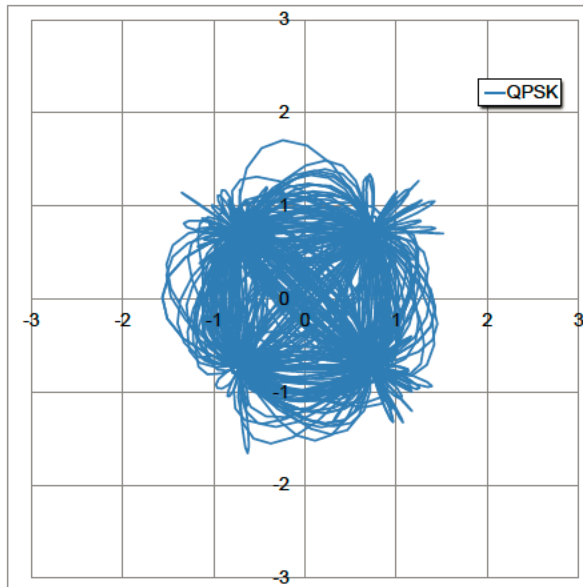
PAPRの観点からは 4値FSK方式の出力を基準とした場合、QPSK方式で約3dB、16QAM方式の場合約6dBの差異が発生することより、4値FSK方式が有利であるといえる。

【参考資料】 1－1. 各種変調方式の検討＜机上検討＞

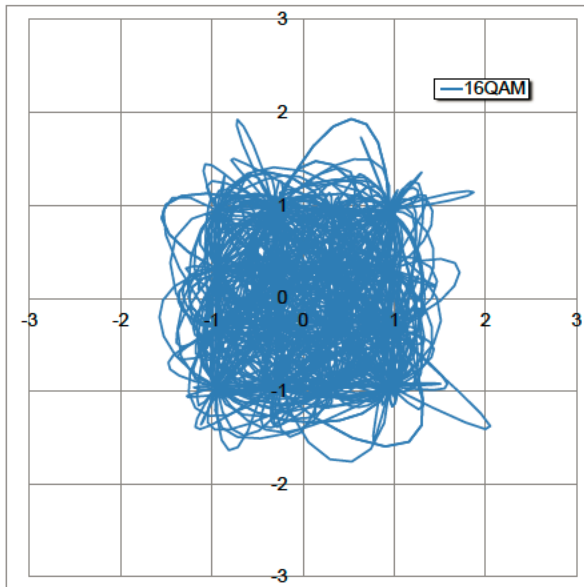
＜位相遷移の比較＞



4値FSK方式



QPSK方式



16QAM方式

【参考資料】 1－1. 各種変調方式の検討＜机上検討＞

(3)遅延波対策 ・・SC方式とSCBT方式のベースバンド伝送系について演算処理量の観点で比較

■ 検討内容

SC方式とSCBT方式のベースバンド伝送系を比較し、受信機における遅延波対策の容易さについて演算処理量の観点から検討を行った。

■ 検討結果

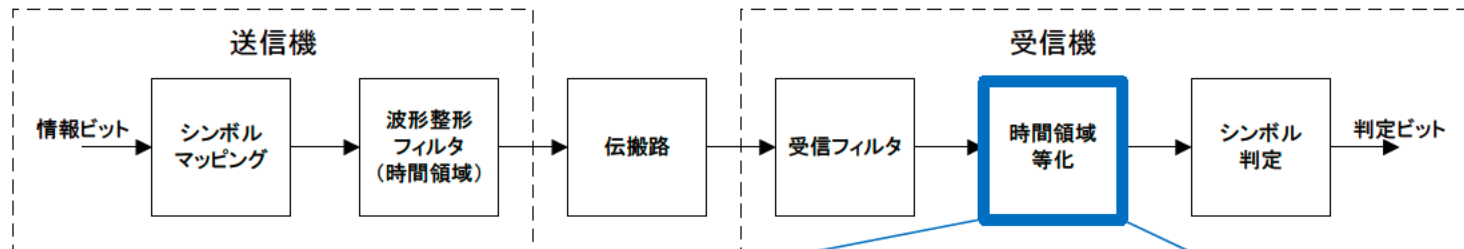
SC方式では、遅延波数に応じて処理量が指数関数的に増加する。

SCBT方式では、遅延等化に係る演算処理量が遅延波数に依存せず一定の処理量となる。

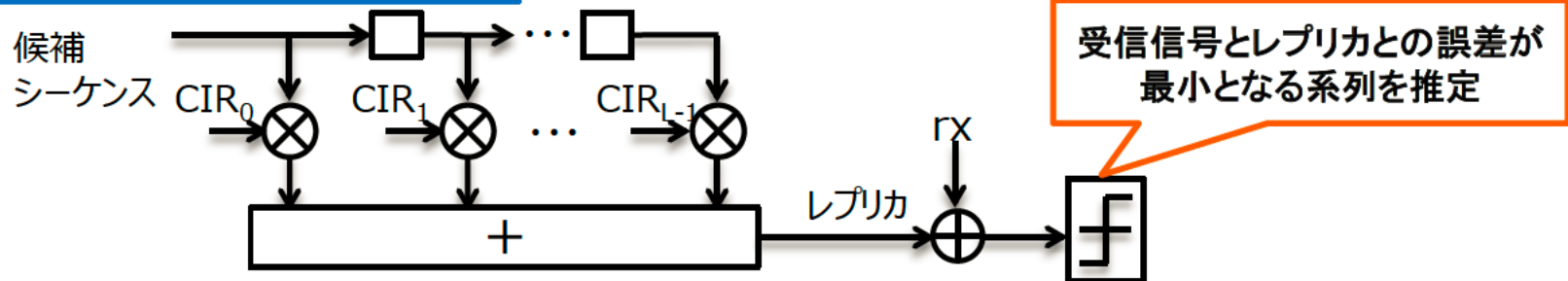
屋外における伝送環境を考慮した場合、様々な遅延波環境を想定する必要があるため、設計の容易さからSCBT方式が有利と考えられることより、本検討においてはSCBT方式を採用するものとする。

【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

<SC方式のベースバンド伝送系の演算処理量>



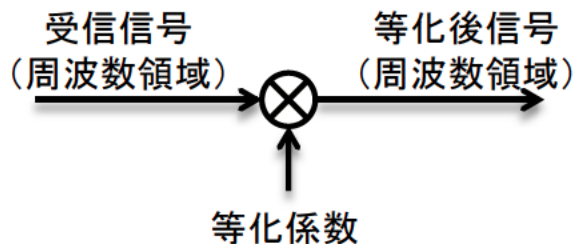
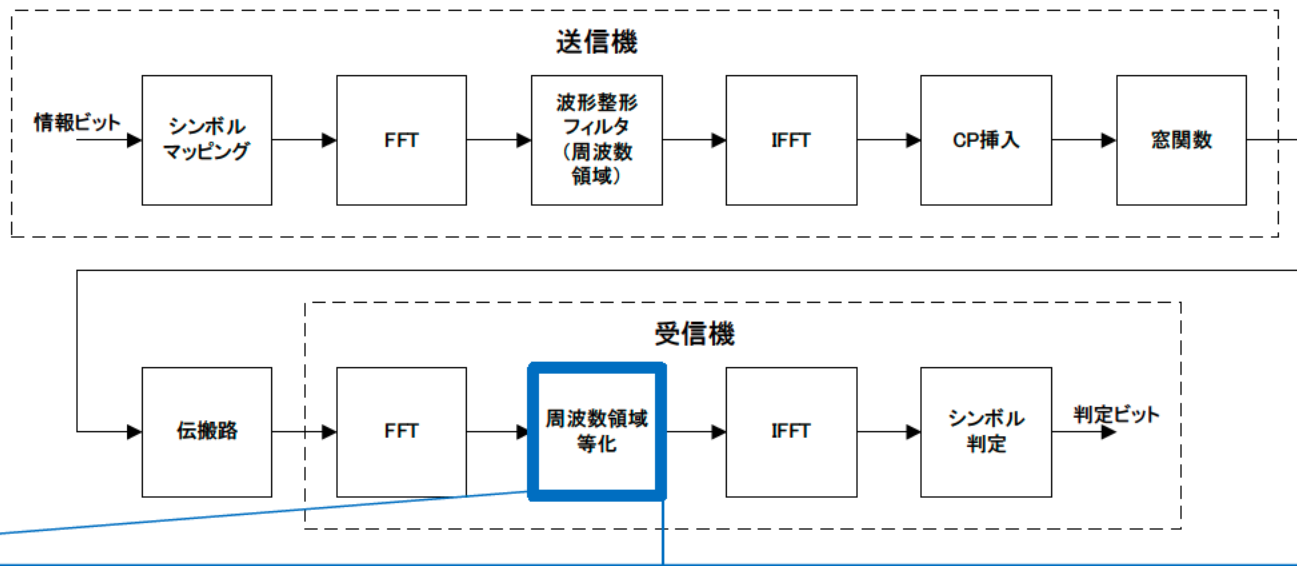
MLSE型時間領域等化器



レプリカ候補数 = (変調多値数)^{タップ数}
→ 遅延波数に対して指数関数的に処理量が増加

【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

<SCBT方式のベースバンド伝送系の演算処理量>



遅延波数に依らずサブキャリア当たり
1タップの等化係数乗算のみで実現可能

【参考資料】 1-1. 各種変調方式の検討<机上検討>

(4) 狭帯域化 ・ SC方式とSCBT方式の占有帯域幅を比較

① SC方式とSCBT方式のスペクトラム比較

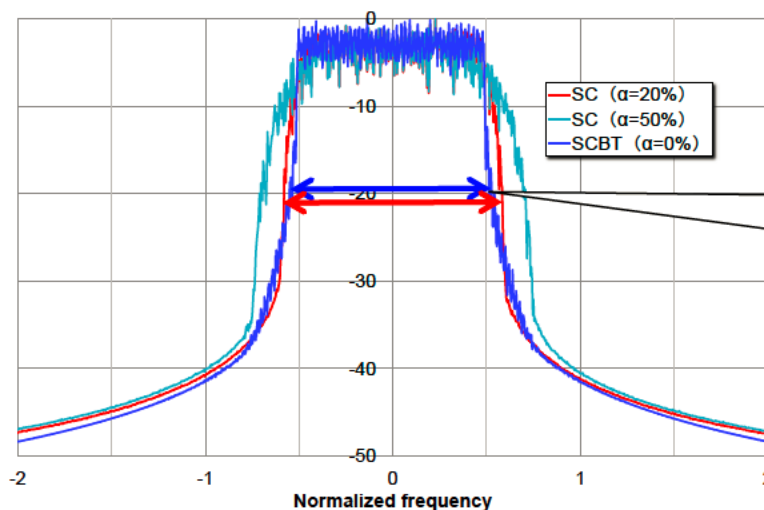
■ 検討内容

SC方式とSCBT方式のスペクトルを計算機シミュレーションで取得し、占有帯域幅を比較した。比較には一次変調として振幅変動のあるQPSK方式を用いた。

■ 検討結果

SCBT方式は変調信号生成処理においてロールオフ率0%の周波数領域波形整形フィルタを適用することにより、狭帯域化が可能となることから、SCBT方式が有利であるといえる。

<SC方式とSCBT方式のスペクトラム比較>



99%電力占有帯域幅にて、
SCBT($\alpha=10\%$)はSC($\alpha=20\%$)の
90%狭帯域化が可能である

グラフの横軸はシンボルレートで正規化した周波数を、
縦軸は相対利得を示す。

【参考資料】 1－2. 帯域幅毎の特性検討＜机上検討・ラボ試験＞

(1) 帯域幅 ・ ・ 距離対受信信号強度特性からCNRを算出しAWGN環境下でのBER特性を評価

■ 検討内容

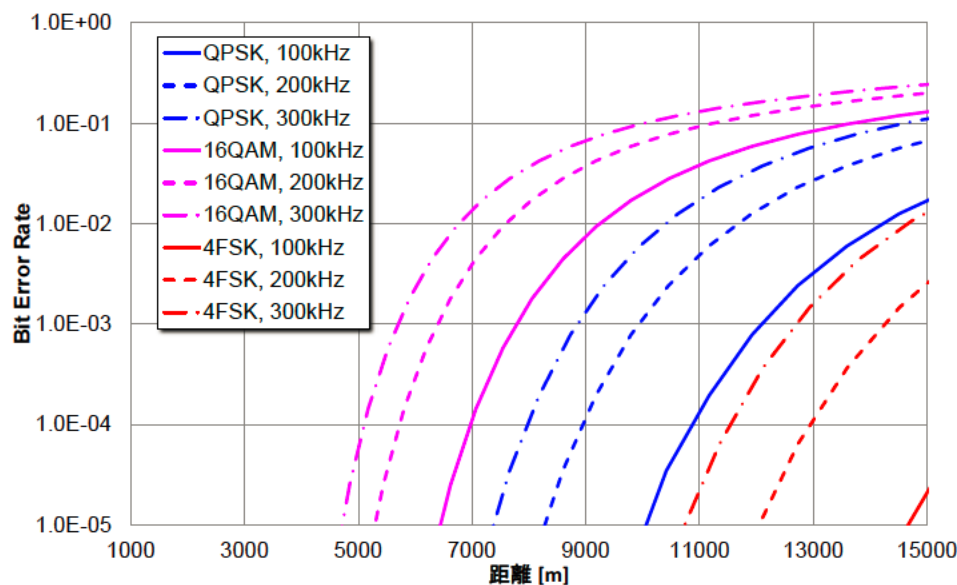
距離対受信信号強度特性からCNRを算出(親局無線機のノイズ指数=8dBを仮定)し、AWGN環境下でのBER特性を計算機シミュレーションで評価した。

■ 検討結果

所要CNRが高い16QAM方式は通信距離の観点から不利であることが確認できた。また、「各種変調方式の検討結果」でも記載の通り、PAPR特性において16QAM方式は、送信機に実装されるパワーアンプの直線性の問題から、4値FSK方式やQPSK方式に比べ、より大きなバックオフが必要となり、相対的な通信距離は更に低減するものと考えられる。

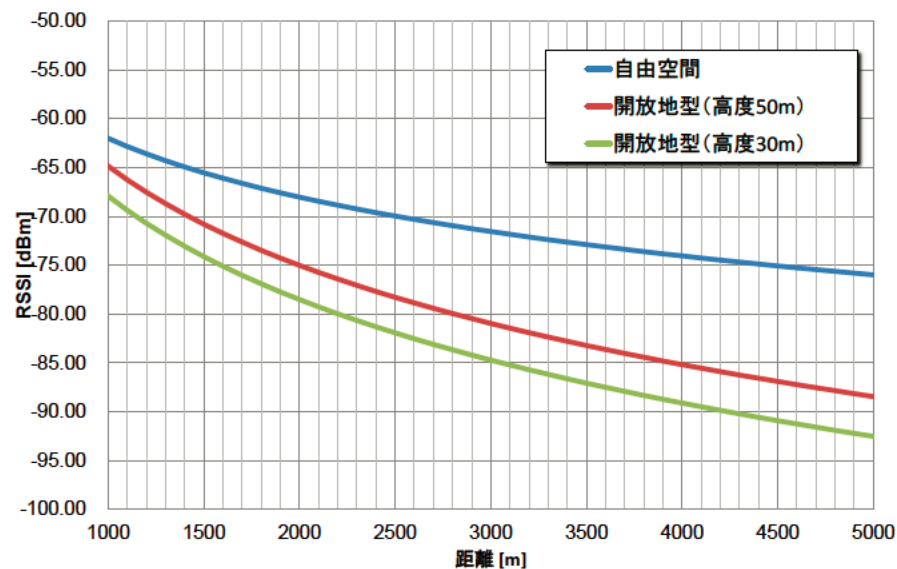
【参考資料】 1-2. 帯域幅毎の特性検討<机上検討・ラボ試験>

<距離対ビット誤り率特性>



奥村・秦モデル 開放地型、高度30m

<距離対受信信号強度特性>



項目	パラメータ
子局送信電力	10dBm
子局送信アンテナ	0dBi
親局受信アンテナ	5dBi
子局アンテナ高	30m/50m
親局アンテナ高	2m

【参考資料】 1-2. 帯域幅毎の特性検討<机上検討・ラボ試験>

(2) 符号化率・・畳込み符号を適用した場合のビット誤り率特性と通信距離の変化を評価

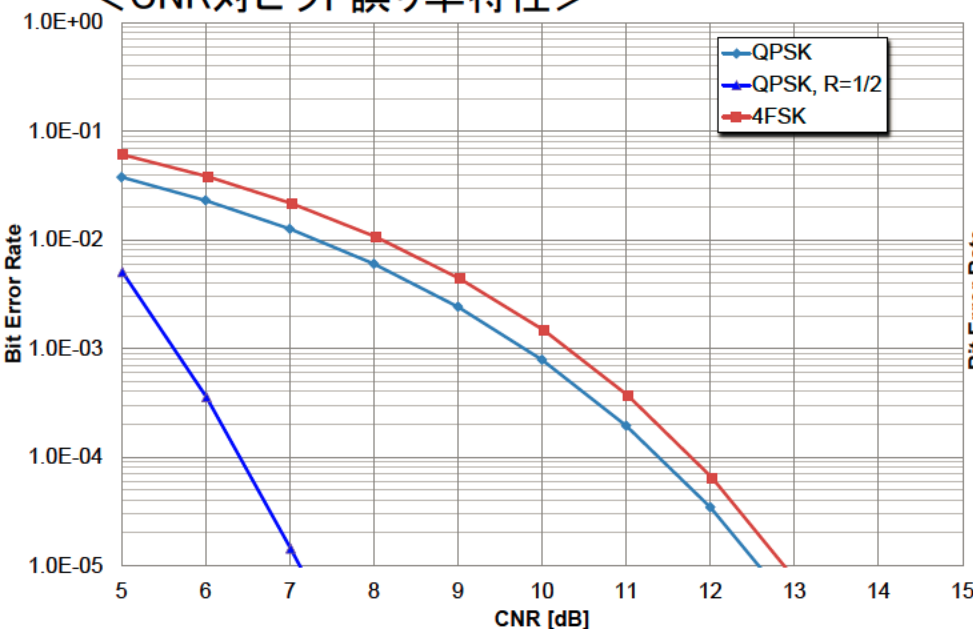
■ 検討内容

拘束長 $K=7$ 、符号化率 $R=1/2$ の畳込み符号を適用した場合のQPSK方式に関するビット誤り率特性を計算機シミュレーションで評価し、符号化無しのQPSK方式および4値FSK方式と比較した。

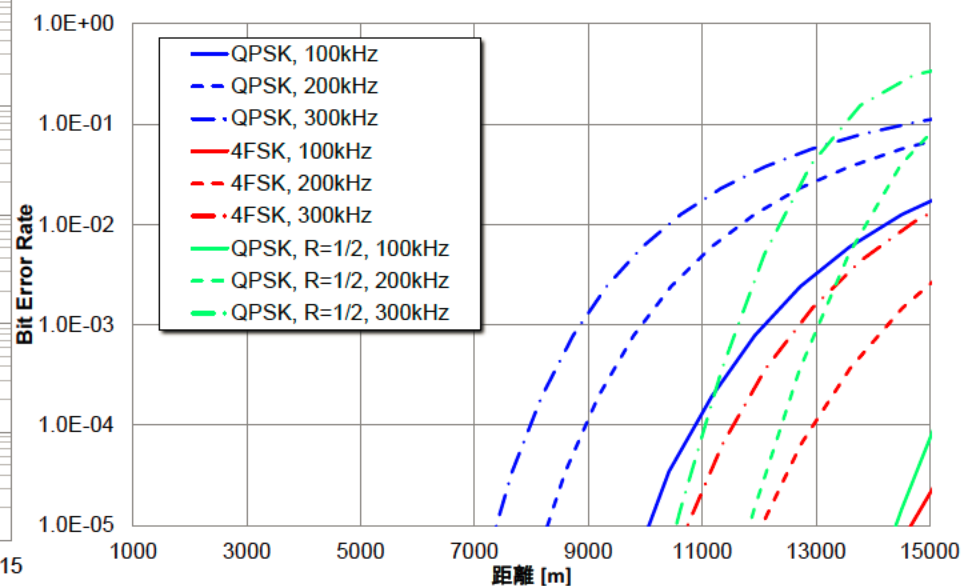
■ 検討結果

誤り訂正を適用することでQPSK方式の通信距離が拡大し、4値FSK方式に近づくことを確認した。

<CNR対ビット誤り率特性>



<距離対ビット誤り率特性>



【参考資料】 1－2. 帯域幅毎の特性検討＜机上検討・ラボ試験＞

(3) フレーム長 ・・畳込み符号を適用した場合のフレーム誤り率特性を評価

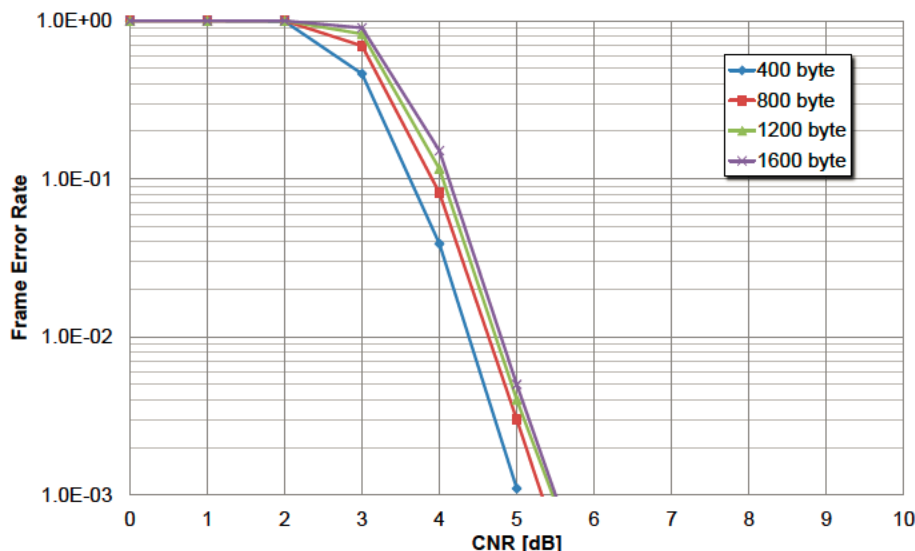
■ 検討内容

拘束長 $K=7$ 、符号化率 $R=1/2$ の畳込み符号を適用した場合のQPSK方式に関するフレーム誤り率特性を計算機シミュレーションで評価した。

■ 検討結果

400byte/フレームを基準にフレーム長を変えて評価した結果、フレーム長を400byteとした場合が最も良好な特性となることを確認した。

＜CNR対フレーム誤り率特性＞



【参考資料】 1－2. 帯域幅毎の特性検討<机上検討・ラボ試験>

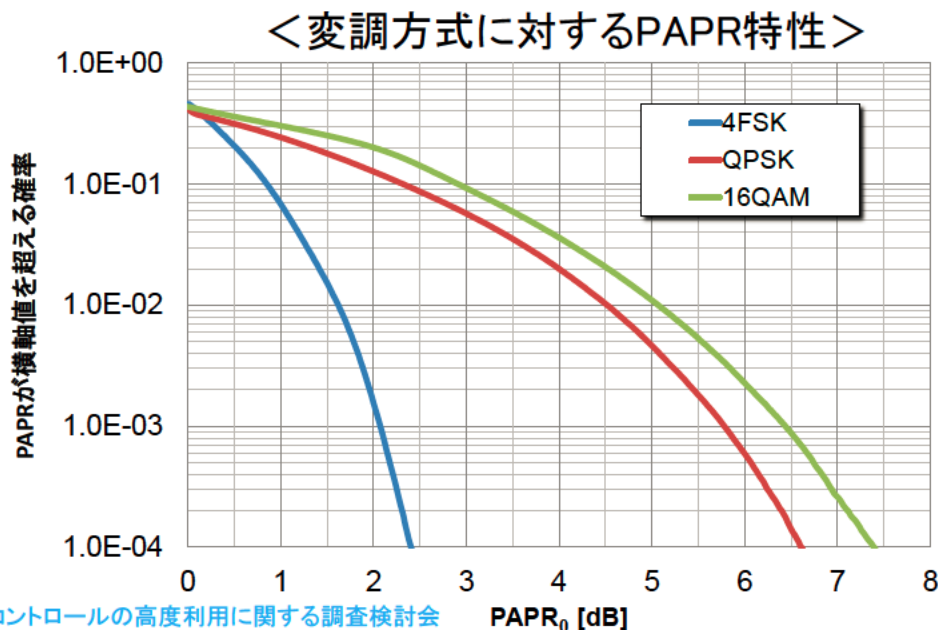
(4) 変調方式 ・・通信品質 (BER) と電力効率 (PAPR) を計算機シミュレーションで評価

■ 検討内容

4値FSK方式、QPSK方式、16QAM方式の通信品質 (BER) と電力効率 (PAPR) を計算機シミュレーションで評価した。

■ 検討結果

4値FSK方式、QPSK方式、16QAM方式のPAPR (Peak to Average Power Ratio) を評価した結果 (PAPR=0dBは定包絡線波形に相当する)、PAPRが小さいほど電力増幅器の非線形性の影響を受けにくくなることを確認した。



$$\text{PAPR [dB]} = 10 \log_{10} \frac{\text{瞬時信号電力}}{\text{平均信号電力}}$$

【参考資料】 1-2. 帯域幅毎の特性検討<机上検討・ラボ試験>

(5)環境 ・・ラボ試験による机上検討結果との比較

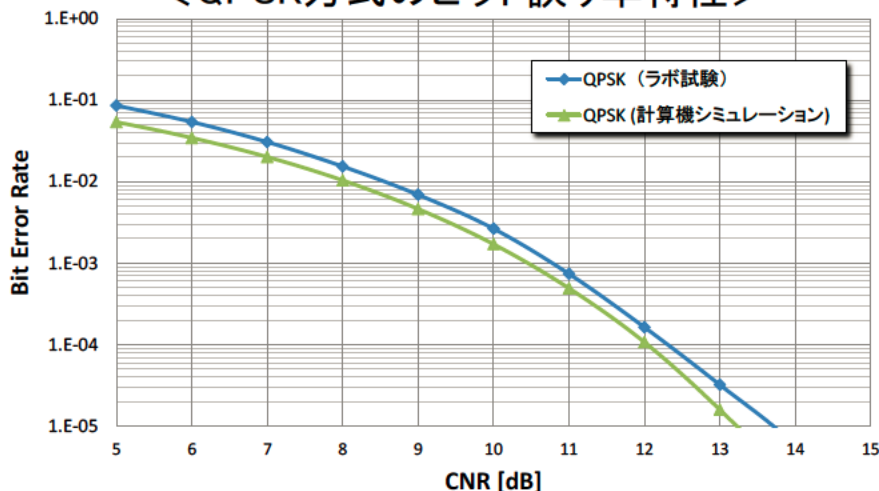
■ 検討内容

机上検討において選定したQPSK方式について、子局と親局を同軸ケーブルで接続し、CNR対BER特性を評価した。また参考として4値FSK方式についても評価した。

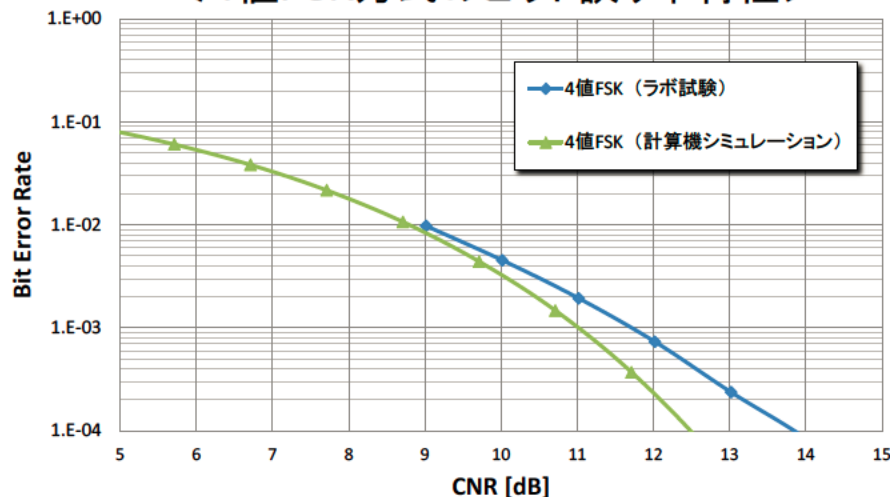
■ 検討結果

両変調方式共に机上検討による計算機シミュレーション結果と同等の傾向を示すことが確認できた。計算機シミュレーションとラボ試験結果との特性差は、計算機シミュレーションでは理想条件として評価しているアナログ部の歪みによるものと考えられる。

<QPSK方式のビット誤り率特性>



<4値FSK方式のビット誤り率特性>



【参考資料】 1－3. 伝搬環境を模擬した検討＜机上検討・ラボ試験＞

①机上検討

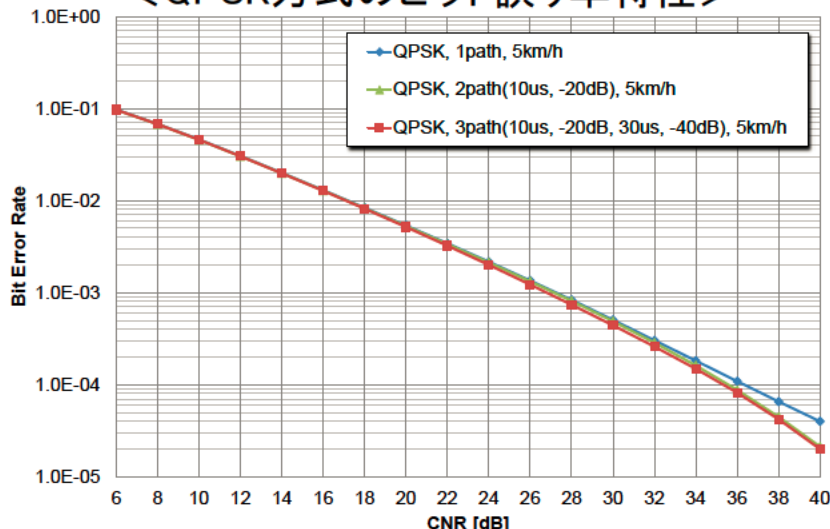
■ 検討内容

QPSK方式に対してレイリーフェージング伝搬環境を模擬した計算機シミュレーションを行った。また参考として4値FSK方式についても評価した。

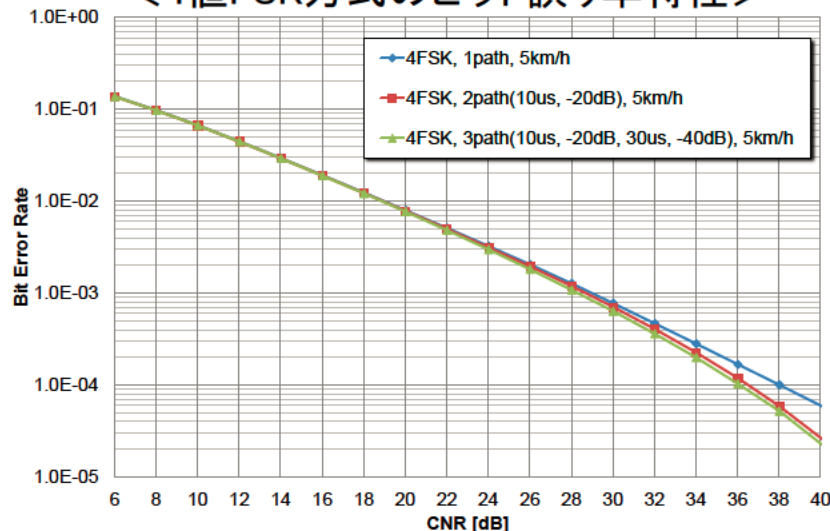
■ 検討結果

遅延波の条件は1パス（遅延波無し）、2パス（10 μ s遅延、-20dB）、3パス（10 μ s・20 μ s遅延、-20dB・-40dB）とした。QPSK方式、4値FSK方式ともにCNRが低い環境では伝搬環境に依らず同等の性能を示し、CNRが高くなると遅延波が存在している環境の方が性能が良くなる傾向を示した。これは、遅延波の受信レベルが雑音より高くなり、パスダイバーシチ効果が得られたためと考えられる。

＜QPSK方式のビット誤り率特性＞



＜4値FSK方式のビット誤り率特性＞



【参考資料】 1－3. 伝搬環境を模擬した検討＜机上検討・ラボ試験＞

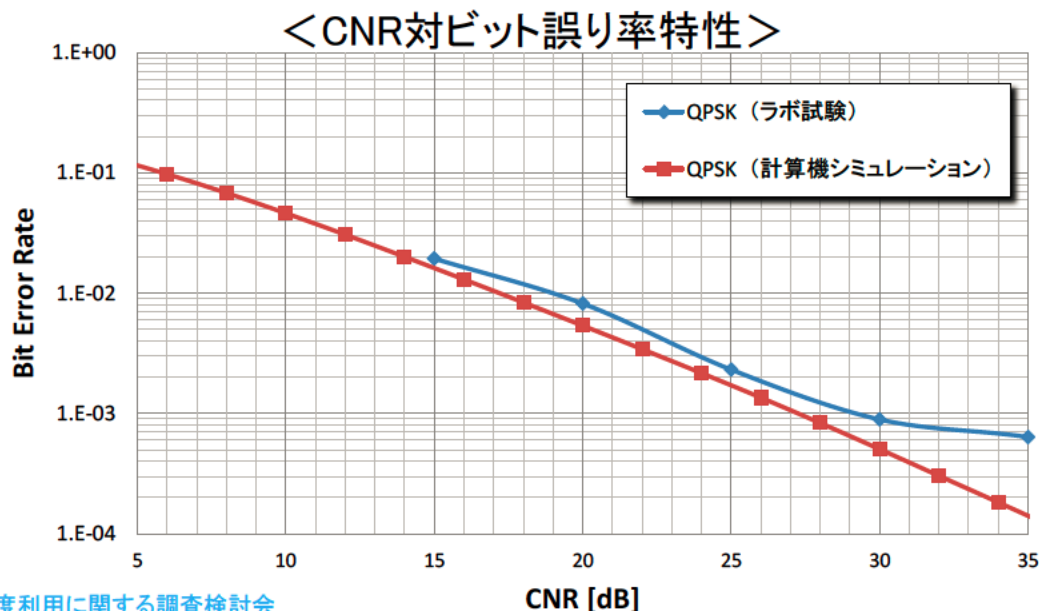
②ラボ試験

■ 検討項目

一次変調方式として選定したQPSK方式について、計算機シミュレーション結果で導き出されたパラメータを適用し、疑似伝送路を使用してQPSK方式のCNR対BER特性の測定を行った。

■ 検討結果

伝搬環境の条件は移動速度5km/hの1パスとした。結果、CNR > 30dB付近まで計算機シミュレーション結果と同等の傾向を示すことが確認できた。計算機シミュレーションとラボ試験結果との特性差は、計算機シミュレーションでは理想条件として評価しているが、ラボ試験では、無線機のアナログ部の歪みによる劣化が発生しているものと考えられる。



【参考資料】 1-4. 静止画・動画伝送の検討<ラボ試験>

(1)テレメータ機能試験 ・・動画伝送による視聴限界の確認

①無線機の実伝送レート

■ 検討項目

動画フォーマットとしては、H.264フォーマットを用い、動画品質を鑑み、設定値を下記とした。

一方、無線機においては、データ伝送を行うため、パケット化(プリアンブル、パイロット挿入)、誤り訂正(畳込み符号:拘束長 $K=7$ 、符号化率 $R=1/2$)を導入する。実使用周波数帯域幅は、99%電力帯域が300kHzに収まるよう275kHzと設定し、下記3モードによるデータ伝送を実装した。

■ 検討結果

動画初期ビットレートが120kbpsのため、静止画・動画伝送においては、QPSK、および、QPSK(畳込み符号有)の2モードが有効である。本試験においては、ビット誤り率特性に優れたQPSK(畳込み符号有)において静止画・動画伝送を実施する。

動画フォーマットH.264	初期ビットレート	動画サイズ	フレームレート	I-Frame間隔
設定値	120kbps	320×240	5fps	200ms

変調方式	理論周波数 利用効率 [bps/Hz]	実使用周波数 帯域 [kHz]	パケット 効率[%]	畳込み符号 効率[%]	実伝送レート [kbps]
4値FSK	0.5	275	69.6%	なし	95.7
QPSK	2	275	69.6%	なし	382.8
QPSK (畳込み符号有)	2	275	69.6%	49.9%	190.9

【参考資料】 1－4. 静止画・動画伝送の検討<ラボ試験>

②画像伝送における主観評価

■ 検討項目

信号電力対雑音比(CNR)に対する画像伝送主観評価を行う。主幹評価の項目としては、ブロックノイズ、ノイズ範囲、物体の識別、グレイアウト、再生アプリ停止の5項目とした。

■ 検討結果

主観評価の結果、CNR=7dB以上において、良好な動画伝送が可能であることを確認した。

CNR (dB)	ブロックノイズ	ノイズ範囲	物体の識別	グレイアウト	再生アプリ停止
10	なし	なし	可能	なし	なし
9	なし	なし	可能	なし	なし
8	なし	なし	可能	なし	なし
7	低頻度	部分的	可能	なし	なし
6	定常発生	全体的	可能だが難しい	なし	なし
5	定常発生	全体的	難しい	発生	発生
4	定常発生	全体的	不可	頻繁に発生	頻繁に発生
3	—	—	不可	—	起動せず

【参考資料】 1－4. 静止画・動画伝送の検討<ラボ試験>

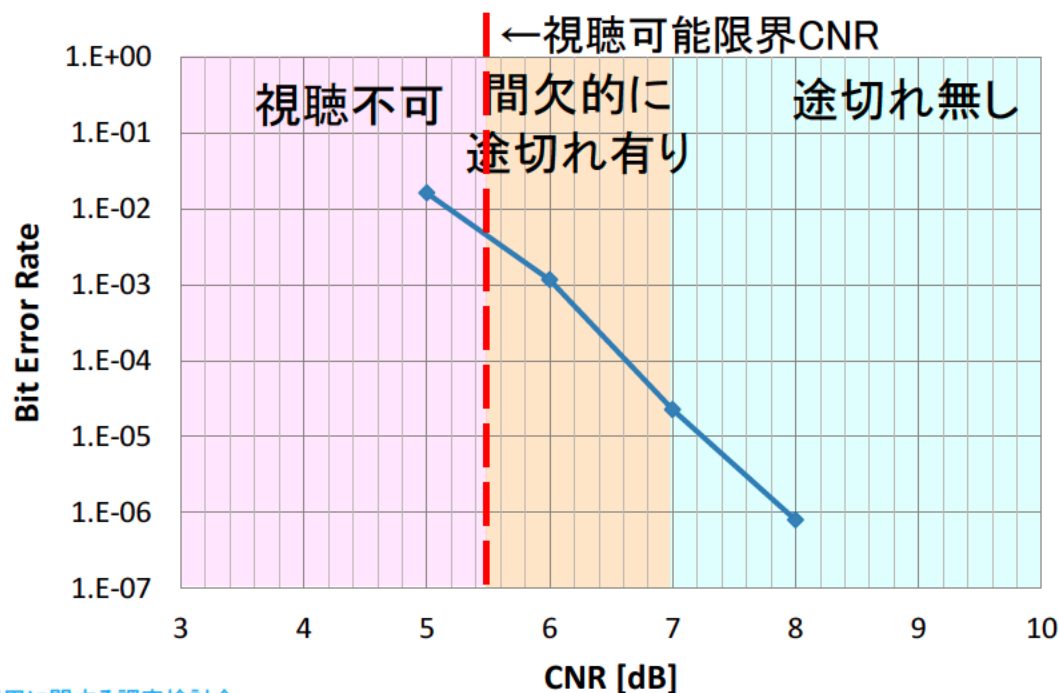
③画像伝送における主観評価とBER誤り率の比較

■ 検討項目

画像伝送における主観評価とBER誤り率の比較を実施した。

■ 検討結果

BER誤り率 2×10^{-5} 以下の性能が得られる場合、途切れの無い高品質な動画伝送が可能である。
また、視聴可能限界となるCNRは約5.5dBとなる。この際のBER誤り率は 5×10^{-3} 程度であり、間欠的に途切れ、ブロックノイズが発生することを許容する必要がある。



【参考資料】 1－4. 静止画・動画伝送の検討<ラボ試験>

(2)テレコントロール機能試験 ・・動画の視聴限界におけるコマンド伝送の確認

①テレコントロールコマンドの成功確率

■ 検討項目

子局に3台のカメラを接続し、親局側からのテレコントロールコマンドにより、3台のカメラ画像の切替が行えることを検証した。テレコントロールコマンド伝送は、テレコントロールコマンドをテレメーター伝送において連送し、多数決判定を行った。

■ 検討結果

動画伝送の視聴可能限界CNRは、約5.5dBであり、BER誤り率 5×10^{-3} の回線品質となる。
この品質において、テレメーター試験結果よりテレコントロールコマンド伝送を評価した結果、100%の確率でコマンド伝送が行えることが確認できた。

コマンド送出回数	正常受信回数	受信失敗回数	成功確率	備考
100	100	0	100%	