

短波通信链路可靠性评估方法

文 | 国家无线电监测中心 李英华 国家无线电监测中心乌鲁木齐监测站 林自豪 刘天康 张宁 (通讯作者)

摘要: 本文介绍了短波信号在传输过程中可能受到的噪声和干扰功率的计算方法, 根据计算得到的噪声功率、干扰功率, 来确定短波发射台站布站时的频率和距离间隔, 最后给出短波系统通信链路的可靠性和兼容性等的综合评估指标, 为短波通信链路设计和优化提供必要的技术参考。

关键词: 短波通信 可靠性 噪声 干扰 兼容性

0 前言

短波通信可以沿地面进行近距离的地波传播, 也可以利用电离层的反射作用进行远距离的天波传播。一直以来, 短波通信设备因其机动性高、中远程性能良好、中继成本低、不易摧毁等优势, 在军事、外交、气象和商业等领域发挥了很大的作用。在军事领域, 军用短波电台是军事数据链通信网络中必不可少的一环。此外, 短波地波通信方式的通信距离较近, 而通信距离较远的天波通信复杂多变, 对短波通信电台的研发和设计成本相应较高。

每个短波通信的接收端有其固有的接收灵敏度, 短波信号在不同的模式下传播到达接收端时具有不同的功率, 以保障信号能被有效接收。然而在实际通信过程中, 除了判定功率是否满足接收灵敏度的要求, 短波通信质量同样受环境噪声、同信道间干扰、相邻信道间干扰等因素的严重影响, 因此研究短波信号信噪比、信干比及其衍生出的系统可靠性、兼容性等综合评估指标, 对理解短波通信链路的构建很有必要^[1]。

1 噪声功率及干扰功率

在某些场合下, 人们有时会将噪声和干扰混为一谈。对于短波通信而言, 噪声特指大气噪声、人为噪声和银河噪声等, 干扰主要是指由通信范围内布置的其他短波站发射源造成的邻频干扰和邻信道干扰等。对噪声功率和干扰信号功率的预测, 一方面可以有效评估通信链路的信噪比及信干比情况, 另一方面可为短波装备设计以及短波通信点布站, 提供频率隔离和距离隔离的参考标准。

1.1 噪声功率

到达接收端信号的信噪比可表示为:

$$S/N = P_r - 10\log_{10} A - 10\log_{10} B + 204 \quad (1)$$

式中, P_r 为接收端有用功率; B 为噪声信号带宽;

A 为噪声的总和, 如式 (2) 所示:

$$A = 10^{\frac{F_a A}{10}} + 10^{\frac{F_a M}{10}} + 10^{\frac{F_a G}{10}} \quad (2)$$

式中, $F_a A$ 、 $F_a M$ 、 $F_a G$ 分别为大气噪声、人为噪声和银河噪声的噪声系数中间值, 可根据不同应用场景参考文献 [1] 中的取值。

1.2 干扰功率

本文不讨论人为造成的干扰, 仅讨论由其他短波站发射源造成的邻频干扰和邻信道干扰。干扰源在不同时刻可能发射不同特性的信号, 而能否确定干扰信号的类型, 将影响干扰功率的预测方法。

在干扰信号类型确知的情况下, 接收机的干扰电平是干扰源和接收机之间的干扰信号的增益和损耗的函数, 可表示为:

$$I = P_i + G_i + G_r - L_b(d) - FDR(\Delta f) \quad \text{dBW} \quad (3)$$

式中, P_i 为干扰发射机的功率 (dB); G_i 为在接收机方向上干扰天线的增益 (dBi); G_r 为在干扰源方向上的接收机天线的增益 (dBi); $L_b(d)$ 为干扰源与接收机的距离间隔为 d 时的基本传输损耗 (dB), 可参考文献 [2] 中的取值。FDR 为频率相关抑制, 用于衡量由接收机的选择性曲线产生的对无用发射机发射频谱的抑制程度, 可进一步表示为:

$$FDR(\Delta f) = 10 \log \frac{\int_0^\infty P(f) df}{\int_0^\infty P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (4)$$

式中, $P(f)$ 为干扰信号等效中频 (IF) 的功率谱密度; $H(f)$ 为接收机的频率响应, $\Delta f = f_i - f_r$, f_i 是干扰源的即时频率, f_r 是接收机的调谐频率。对于 FDR, 可以将其分为调谐抑制 (OTR) 和频率失谐抑制 (OFR), 后者是由于干扰源和接收机失谐产生了额外抑制, 即:

$$FDR(\Delta f) = OTR + OFR(\Delta f) \quad \text{dB} \quad (5)$$

$$OTR = 10 \log \frac{\int_0^\infty P(f) df}{\int_0^\infty P(f) |H(f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (6)$$

$$OFR(\Delta f) = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} P(f) |H(f)|^2 df}{\int_0^{\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df} \quad \text{dB} \quad (7)$$

OTR 也称为校正因子, 常常近似为:

$$OTR \approx K \log \left(\frac{B_T}{B_R} \right) \quad B_R \leq B_T \quad (8)$$

其中, B_T 为干扰发射机的 3dB 带宽 (Hz); B_R 为被干扰的接收机的 3dB 带宽 (Hz); 对于非相干信号和脉冲信号, $K = 20$ 。

在干扰信号类型无法确定的情况下, 根据干扰源的位置判断可能的通信模式为地波或天波, 利用地波或天波传播模式下的功率预测方法预测到达接收机的各个干扰功率中值^[3], 根据该功率值进一步确定干扰信号的功率为:

$$I = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^K 10^{\frac{I_i + R_i}{10}} \quad (9)$$

式中, K 为有效干扰源数目; I_i 为第 i 个干扰源的干扰功率, 其预测方法与地波或天波信号的传播功率一致; R_i 为第 i 个干扰源的干扰信号保护比, 由用户自定义^[2]。

2 频率和距离间隔

无线电通信系统中的频率和距离间隔 (FD) 的关系是对信道进行划分的重要规则, 例如同信道发射机必须间隔至少 d_0 (km), 相邻信道发射机必须间隔至少 d_1 (km), 间隔两个信道的发射机至少相距 d_2 (km) 等。FD 规则需要计算出受扰接收机输入端的干扰电平, 主要取决于频谱因子和空间因子。空间因子涉及与距离有关的信号衰减的计算, 频谱因子取决于干扰发射机的频谱特性和受扰接收机的频率响应, 需要计算出干扰信号的功率谱密度, 而它又受到诸如基本调制技术、模拟系统信号的带宽、数字系统的发射数据速率等因素的影响。对于受扰接收机, 必须知道接收机等效 IF 频率响应特性^[4]。

频谱因子用频偏抑制因子 $OCR(\Delta f)$ 来表示, 由以下关系式定义:

$$OCR(\Delta f) = -10 \log \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) |H(f + \Delta f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) df} \quad \text{dB} \quad (10)$$

其中, $P(f)$ 为干扰信号的功率谱密度 (W/Hz); $H(f)$ 为受扰接收机的等效 IF 频率响应; Δf 为受扰接收机与干扰发射机的频率间隔, 在公式 (4) 与公式 (10) 中具有同样的含义。

从式 (10) 可以看出, $OCR(\Delta f)$ 完全取决于接收机的通带与干扰信号功率谱的重叠程度。 Δf 增加时, 重叠

程度降低, 就会产生较低的干扰功率, 或者说对应较高的 $OCR(\Delta f)$ 值。

在现实环境中, 受扰接收机的接收信号会经历呈对数正态分布的阴影衰落。为了补偿这种衰落效应, 接收信号电平应高于灵敏度电平, 可用公式 (11) 计算出受扰接收机与干扰源之间所需的隔离度:

$$L_i = P_i + G_r - (P_{\min} - \alpha) - OCR(\Delta f) - 10 \log(10^{N/10} - 1) \quad (11)$$

其中, L_i 为干扰源与受扰接收机之间确保干扰在可容忍范围内所需的隔离度 (dB); P_i 为干扰发射机等效全向辐射功率 (e.i.r.p.) (dBW); G_r 为接收机天线相对于全向天线的增益 (dBi); P_{\min} 为需要的最小信号电平 (dBW); α 为保护比 (dB); $OCR(\Delta f)$ 是由公式确定的频率间隔为 Δf 时的频偏抑制因子; N 为对数正态衰落余量 (dB)。

3 短波通信链路的可靠性和兼容性

无线电通信系统的可靠性即为实现所要求性能的可能性, 是一种性能优劣指数。在选择首选的天线 (如有必要还包括设计优化)、频率和必要发射机功率组合时, 预测各类可靠性对能否达到理想的性能是非常重要的 (见图 1)。

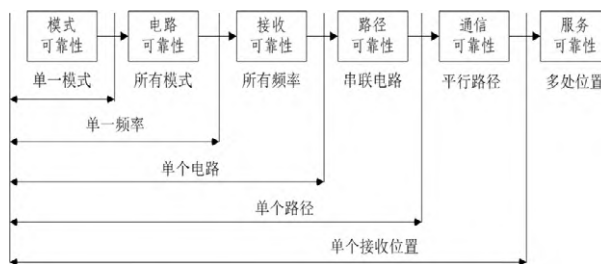


图 1 可靠性分类示意图

基本通信链路可靠性 (BCR), 表示通信链路仅存在噪声的情况下当月成功运行时段的占比情况, 对于 n 个频率而言, 数字调制系统基本接收可靠性 (BRR) 的计算公式如下:

$$BRR = 100 \left[1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{BCR(f_i)}{100} \right) \right] \% \quad (12)$$

其中 $BCR(f_i)$ 为频率 f_i 的 BCR 百分比, 对于单个操作频率, BRR 等于 BCR。进一步可将 BCR 表示为:

$$BCR = \begin{cases} \min \left\{ 130 - \frac{80}{1 + (S/N - S/N_r)/D_r SN}, 100 \right\}, & S/N \geq S/N_r \\ \max \left\{ \frac{80}{1 + (S/N_r - S/N)/D_r SN} - 30, 0 \right\}, & S/N < S/N_r \end{cases} \quad (13)$$

其中, S/N_r 为用户根据系统性能需求预期定义的信噪比值; S/N 为到达接收端信号的信噪比, 可进一步表示为:

$$S/N = P_r - 10 \lg A - 10 \lg B + 204 \quad (14)$$

式中, P_r 为接收端有用功率; A 为噪声的总和, 同式(1); B 为信号带宽; 产生信噪比的上十分位差 ($D_u SN$) 和下十分位差 ($D_l SN$) 分别为:

$$D_u SN = \sqrt{D_u S_d + D_u S_h + 10 \lg \left(\frac{A}{10^{\frac{F_d A - D_d A}{10}} + 10^{\frac{F_d M - D_d M}{10}} + 10^{\frac{F_d G - D_d G}{10}}} \right)} \quad (15)$$

$$D_l SN = \sqrt{D_l S_d + D_l S_h + 10 \lg \left(\frac{10^{\frac{F_d A + D_d A}{10}} + 10^{\frac{F_d M + D_d M}{10}} + 10^{\frac{F_d G + D_d G}{10}}}{A} \right)} \quad (16)$$

其中, $D_l A$ 、 $D_l M$ 和 $D_l G$ 分别为大气噪声、人为噪声和银河噪声的下十分位差; $D_u A$ 、 $D_u M$ 和 $D_u G$ 分别为大气噪声、人为噪声和银河噪声的上十分位差; $D_l S_d$ 和 $D_l S_h$ 分别为每日信号上十分位差和每时信号下十分位差; $D_u S_d$ 和 $D_u S_h$ 分别为每日信号上十分位差和每时信号下十分位差, 具体值可参考文献 [4]。

与 BCR 类似, ICR 可表示为:

$$ICR = \begin{cases} \min \left\{ 130 - \frac{80}{1 + (S/I - S/I_r)/D_l SI}, 100 \right\}, & S/I \geq S/I_r \\ \max \left\{ \frac{80}{1 + (S/I_r - S/I)/D_u SI} - 30, 0 \right\}, & S/I < S/I_r \end{cases} \quad (17)$$

式中, S/I_r 为用户根据系统性能需求预期定义的信干比值; $D_l SI$ 和 $D_u SI$ 为信干比的下十分位差, 其计算方法与信噪比的下十分位差类似; S/I 为到达接收端信号的信干比, 可进一步表示为:

$$S/I = P_r - 10 \lg \sum_{i=1}^K 10^{\frac{I_i + R_i}{10}} \quad (18)$$

式中, K 为有效干扰源数目; I_i 为第 i 个干扰源的干扰功率, 其预测方法与地波或天波信号的传播功率一致^[3]; R_i 为第 i 个干扰源的干扰信号保护比。

在短波通信系统中, 通常利用总体通信链路可靠性 (OCR) 评估通信性能, 可将其表示为:

$$OCR = \min(BCR, ICR) \quad (19)$$

对于一条以上通信链路的情况, 基本通信链路可靠性 (BPR) 的下界估计值为路径上所有通信链路接收可靠性 (BRR) 的乘积:

$$BPR = 100 \left[1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{BRR_i}{100} \right) \right] \% \quad (20)$$

其中 BRR_i 为路径 i 的 BRR, 上界估计值为最小的

BRR, 对单条通信链路, BPR 等于 BRR。

对于一条以上路径的情况, 基本通信可靠性 (R) 的下界估计值可用路径可靠性的最大值表示, 上界估计值可表示为:

$$R = 100 \left[1 - \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{BPR_i}{100} \right) \right] \% \quad (21)$$

其中 BPR_i 为路径 i 的基本路径可靠性, 对于单个路径的情况, R 等于 BPR。

兼容性是对一条通信链路或业务在受到干扰时发生退化的衡量。对于单条点对点通信链路, 通信链路兼容性 (CC) 可用受到干扰时在接收机位置实现的特定标准的服务质量的时间与仅存在噪声时的值 (BCR) 的百分比表示:

$$CC = 100 \frac{OCR}{BCR} \% \quad (22)$$

如果所需业务适用于一个地区而非单个接收点, 兼容性可用两种方式表示:

①时间服务兼容性 (TSC), 在存在干扰的情况下, 目标地区 p_A 一定比例的部分可享受服务的时间 (总体服务可靠性 (OSR)) 与仅存在环境噪声时的值 (BSR) 的百分比:

$$TSC = 100 \frac{OSR(p_A)}{BSR(p_A)} \% \quad (23)$$

②地区服务兼容性 (ASC), 在存在干扰 A_i 的情况下, 在一定比例的时间 p_T 内可享受业务的目标区与仅存在环境噪声 A_N 时的值的百分比:

$$ASC = 100 \frac{A_i(p_T)}{A_N(p_T)} \% \quad (24)$$

式中, 地区 A 可用满足所需条件的测试点的数量表示。

4 总结

本文内容围绕短波通信链路评估, 对短波信号的噪声功率和干扰功率这两个技术参数进行研究。给出了噪声功率和干扰功率的计算方法、链路可靠性和兼容性的评估方法, 以及对多条链路、多条路径情况下的综合评估方法, 可为短波通信系统的方案设计以及改良现有短波通信系统等提供参考。

参考文献:

- [1] ITU-R REC P.372, 无线电噪声
- [2] ITU-R REC P.341, 无线电链路传输损耗概念
- [3] ITU-R REC P.533, HF 电路性能的预测方法
- [4] ITU-R REC P.337, 频率与距离间隔