

外辐射源雷达的相干积累增益计算及性能分析

高志文, 陶 然

(北京理工大学电子工程系, 北京 100081)

摘 要: 本文在分析外辐射源雷达参考通道和目标回波通道信号特点的基础上, 推导了外辐射源雷达的相干积累增益与参考通道信噪比、信号有效带宽和相干积累时间的关系, 为预测其探测威力提供了理论基础. 然后验证和分析了相干积累增益与参考通道信噪比之间的关系, 并由此对外辐射源雷达布站的基线选择提出了一些建议.

关键词: 外辐射源雷达; 相干积累增益; 参考通道; 基线选择

中图分类号: TN958. 97 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2008)06-1227-04

Computation and Analysis of Coherent Accumulation Gain for Passive Radar

GAO Zhīwen, TAO Ran

(Department of Electronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on analysis of the signal characteristic of the reference channel and the target echo channel for passive radar, we derive the relations of the coherent accumulation gain formula, the signal to noise ratio (SNR) of the reference channel, the effective bandwidth of the signal and the coherent accumulation time, which provides the theoretical base for predicting the detection performance of passive radar. Moreover, some suggestions for the baseline selection of passive radar are presented after the relations between the coherent accumulation gain and the SNR of the reference channel are verified and analyzed.

Key words: passive radar; coherent accumulation gain; reference channel; baseline selection

1 引言

外辐射源雷达是一种利用调频广播、电视等非合作辐射源作为照射源的双/多基地雷达^[1]. 外辐射源雷达具有很强的抗干扰和系统生存能力, 探测隐身飞机与巡航导弹更为有利等优点, 是当今世界各国发展的重点装备^[2-4]. 外辐射雷达利用参考信号与目标回波信号的互模糊函数实现目标回波的相干积累^[5]. Hoyuela 确定外辐射源雷达的接收站位置^[6]和 Griffiths 预测外辐射源雷达的探测性能^[1], 未考虑相干积累性能与参考通道信噪比之间的关系, 使用的是常规连续波雷达的相干积累增益计算方法, 即相干积累增益 G 等于信号有效带宽 B 与相干积累时间 T_c 的乘积.

然而, 在外辐射雷达系统中, 辐射源是非合作的, 发射信号是事先未知的, 且在发射功率一定的条件下, 随着发射站与接收站之间的距离(基线距离)增加, 参考通道信噪比会逐渐下降, 这将导致常规连续波雷达的相干积累增益计算方法在外辐射源雷达中不适用. 因此, 本文将在分析外辐射源雷达信号特点的基础上, 推导外辐

射源雷达的相干积累增益表达式, 并验证和分析相干积累增益与参考通道信噪比之间的对应关系.

2 外辐射源雷达信号模型

外辐射源雷达的工作原理如图 1 所示, 在使用同一高稳定度频率源的条件下, 相干接收参考通道信号与目标回波通道信号, 利用互模糊函数实现相干积累, 根据互模糊函数中尖峰位置测量目标回波信号与参考信号的时延差和多普勒频移.

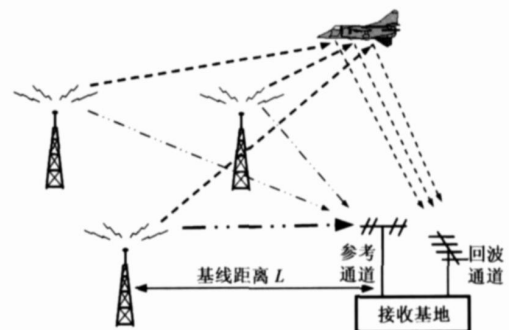


图 1 外辐射源雷达的工作原理示意图

收稿日期: 2007-08-06; 修回日期: 2008-02-22

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 60625104); 国家自然科学基金(No. 60232010); 国防基础预研项目(No. A2220060039); 北京理工大学优秀青年教师项目(No. 2007YS0101)

为了获取质量好的参考信号,外辐射源雷达的参考通道接收天线要求如下:主波束窄、旁瓣低,同时架设在离地面较高的位置,这时可忽略参考通道中的多径信号.如果外辐射源雷达工作在单频网中,不同发射基地的同频信号对参考通道造成较强的多径干扰,这时可采用均衡或者空域滤波的方法得到其中一个发射台的直达波信号.为分析方便,令 $s(t)$ 为功率归一化的直达波信号, $n_R(t)$ 为参考通道中功率归一化的噪声, k_R 为参考通道中噪声的功率归一化系数, $A_{R_{SN}}^2 = (S/N)_{in,R}$ 为参考通道信噪比,这时零中频的参考通道信号表示为

$$u(t) = k_R [A_{R_{SN}} s(t) + n_R(t)] \quad (1)$$

在外辐射源雷达的目标通道中,直达波及多径干扰功率通常远大于目标回波信号和噪声的功率,将采用自适应对消或者空域滤波技术抑制直达波及多径干扰.令 $I(t)$ 为直达波及多径干扰信号, $n_T(t)$ 为目标回波通道中的噪声,这时零中频的目标回波通道信号表示为

$$v(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i s(t - \tau_i) e^{j2\pi f_i (t - \tau_i)} + \underbrace{\sum_{k=0}^{M-1} A_k s(t - \tau_k)}_{I(t)} + n_T(t) \quad (2)$$

其中, A_i , τ_i 和 f_i 分别表示各个目标回波信号的幅度、时延差和多普勒频移.

3 相干积累增益计算

参考通道信号与目标回波通道信号的互模糊函数定义为^[7]:

$$|X(\tau, f_d)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) v^*(t + \tau) e^{j2\pi f_d t} dt \right|^2 \quad (3)$$

其中, τ 是时延, f_d 是多普勒频移. 由于相干积累时间 T_c 是有限长的,长度截断相当于加一个矩形窗. 然而矩形窗的旁瓣峰值高,因此根据需要选用旁瓣低的窗函数,代价是主瓣稍宽.

外辐射源雷达的参考信号种类很多,但都可近似看成是由随机分量和周期性分量组成. 例如,模拟电视的伴音信号中只有随机分量,而数字电视地面广播信号和数字音频广播信号中除了随机分量外,都含有用于常规接收机同步以及信道估计的周期性分量^[8-10]. 周期性分量在互模糊函数中产生周期性副峰^[10],进而可能会引起副峰所在位置的相干积累增益损失. 因此下面将对参考信号有无周期性分量分别进行讨论.

3.1 参考信号无周期性分量

由于相干积累增益的计算与目标的数量无关和外辐射源雷达只检测有多普勒频移的目标,因此假设式中只有一个幅度为 A_T , 位于 (τ_T, f_T) 的动目标,且在相干积累时间内目标多普勒不会发生变化. 令 $c(t)$ 为目标通道中残留的直达波及多径干扰和噪声的功率归一化结

果,相干积累前的信-干噪比为

$$\left(\frac{S}{IN} \right)_{in,T} = A_{T_{SN}}^2 \quad (4)$$

k_T 为相对应的功率归一化系数,因此,式(2)可改写为

$$v(t) \approx k_T \left[A_{T_{SN}}^2 s(t - \tau_T) e^{j2\pi f_T (t - \tau_T)} + c(t) \right] \quad (5)$$

由式(3)和式(5)可知,当 $(\tau, f_d) = (\tau_T, f_T)$ 时,参考通道信号与目标回波通道信号的相关性最大,输出的峰值信号-平均干扰和噪声的功率比最大,可得

$$\begin{aligned} |X(\tau_T, f_T)|^2 = & \left| k_R k_T \left[X_{ss}(\tau_T, f_T) + X_{sc}(\tau_T, f_T) + X_{sn_R}(\tau_T, f_T) + X_{n_Rc}(\tau_T, f_T) \right] \right|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$X_{ss}(\tau_T, f_T) = A_{R_{SN}} A_{T_{SN}} \int_0^{T_c} |s(t)|^2 dt = A_{R_{SN}} A_{T_{SN}} T_c \quad (7)$$

$$X_{sc}(\tau_T, f_T) = A_{R_{SN}} \int_0^{T_c} s(t) c^*(t) e^{j2\pi f_T t} dt \quad (8)$$

$$X_{sn_R}(\tau_T, f_T) = A_{T_{SN}} \int_0^{T_c} s^*(t) n_R(t) dt \quad (9)$$

$$X_{n_Rc}(\tau_T, f_T) = \int_0^{T_c} n_R(t) c^*(t) e^{j2\pi f_T t} dt \quad (10)$$

设信号在时域上的均方根为 M_t , 相干积累时间为 T_c , 在频域上的均方根为 M_f , 有效带宽为 B , 那么分别用它们表示信号的能量,将有

$$M_t^2 T_c = M_f^2 B \quad (11)$$

因为相关运算可看成卷积,于是从统计的意义上可以得到,在时域上的均方根分别为 $M_{1,t}$ 和 $M_{2,t}$ 的两个信号作卷积后的信号均方根为 $M_{3,t}$, 它们满足

$$M_{3,t} = M_{3,f} \sqrt{\frac{B}{T_c}} = M_{1,f} M_{2,f} \sqrt{\frac{B}{T_c}} = M_{1,t} M_{2,t} \sqrt{\frac{T_c}{B}} \quad (12)$$

由于 $X_{sc}(\tau_T, f_T)$ 、 $X_{sn_R}(\tau_T, f_T)$ 和 $X_{n_Rc}(\tau_T, f_T)$ 都可看成是一个平稳的噪声,因此用均方根由式(12)近似表示式(8)~(10)分别得到

$$X_{sc}(\tau_T, f_T) \approx A_{R_{SN}} \sqrt{\frac{T_c}{B}} \quad (13)$$

$$X_{sn_R}(\tau_T, f_T) \approx A_{T_{SN}} \sqrt{\frac{T_c}{B}} \quad (14)$$

$$X_{n_Rc}(\tau_T, f_T) \approx \sqrt{\frac{T_c}{B}} \quad (15)$$

由式(7)和式(13)~(15)可得相干积累后的峰值信号-平均干扰和噪声的功率比

$$\left(\frac{S}{IN} \right)_{out} \approx \frac{1}{\frac{1}{A_{T_{SN}}^2} + \frac{1}{A_{R_{SN}}^2} + \frac{1}{A_{R_{SN}}^2 A_{T_{SN}}^2}} BT_c \quad (16)$$

外辐射源雷达的目标回波通道信-干噪比一般远小

于参考通道信噪比, 即 $A_{T_{S/N}}^2 \ll A_{R_{S/N}}^2$, 结合式(4)和(16)可得相干积累增益(信-干噪比改善因子)

$$G = \frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in,T}} = \frac{1}{1 + \frac{A_{T_{S/N}}^2}{A_{R_{S/N}}^2} + \frac{1}{A_{R_{S/N}}^2}} BT_c$$

$$\approx \frac{1}{1 + \frac{1}{A_{R_{S/N}}^2}} BT_c = \frac{1}{1 + \frac{1}{(S/N)_{in,R}}} BT_c \quad (17)$$

3.2 参考信号含有周期性分量

参考信号中的周期性分量在互模糊函数中会产生周期性副峰, 这些副峰相对于主峰的幅度不会随着积累时间的增加而降低, 且部分副峰位于 $f_d \neq 0$ 区^[10]. 当目标主峰 (τ_T, f_T) 位于直达波及多径干扰副峰所在位置时, 随着相干积累时间 T_c 的增大, 目标主峰幅度和干扰副峰幅度都增加, 相对幅度由周期性分量占参考信号的比例决定. 因此在干扰副峰位置的相干积累增益会降低, 在干扰副峰位置外的相干积累增益仍然满足式(17). 通过预处理参考信号中的周期性分量可有效地抑制副峰^[10], 可以避免周期性分量在干扰副峰处引起的相干积累增益损失, 其代价是损失少量参考信号功率, 具体损失多少由不同信号的周期分量功率占信号总功率之比确定.

4 试验验证与性能分析

利用实测的数字电视地面广播信号和计算机产生的高斯随机白噪声, 分别产生参考通道信号和目标回波通道信号. 假设 $BT_c = 10^5$ 和积累时间内目标多普勒不会发生变化, 采用蒙特卡罗法试验验证式(17)中相干积累增益与参考通道信噪比之间的关系. 在七组不同的参考通道信噪比条件下, 分别做 1000 次试验, 相干积累增益的结果如图 2 所示, 试验值接近理论值, 表明所推导的相干积累增益公式是正确的.

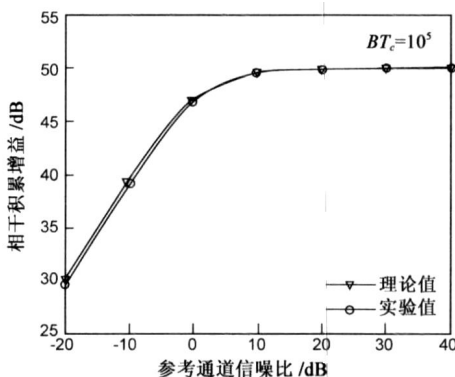


图 2 相干积累增益性能图

根据图 2 的特点, 外辐射源雷达的相干积累增益性能分成三个区间:

$$\begin{cases} \text{近似水平区} & \left\{ \begin{array}{l} (S/N)_{in,R} \geq 10\text{dB} \\ -10\text{dB} < (S/N)_{in,R} < 10\text{dB} \end{array} \right\} \\ \text{转折区} & \\ \text{近似斜线区} & \left\{ \begin{array}{l} (S/N)_{in,R} \leq -10\text{dB} \end{array} \right\} \end{cases}$$

在近似水平区中, 式(17)近似为

$$G \approx BT_c \quad (18)$$

式(18)表明相干积累增益几乎不随参考通道信噪比变化, 其性能接近常规连续波雷达的相干积累增益性能. 在转折区中, 随着参考通道信噪比下降, 相干积累增益呈非线性减小. 在近似斜线区中, 式(17)近似为

$$G \approx (S/N)_{in,R} BT_c \quad (19)$$

式(19)表明相干积累增益与参考通道信噪比呈近似线性关系, 相干积累增益损失约等于参考通道信噪比的绝对值.

通过以上分析, 可利用广播电台、电视台的发射功率、典型气象条件下的电磁波传播特性和 VHF/UHF 波段接收机的典型噪声功率等因素, 估算出典型距离下的外辐射源雷达参考通道信噪比, 并由此对外辐射源雷达布站的基线选择提出了一些建议:

- (1) 为减少相干积累增益损失, 基线距离的选择应保证参考通道信噪比位于近似水平区;
- (2) 在 BT_c 一定条件下, 当参考通道信噪比位于近似水平区, 随着基线距离增加, 相干积累增益几乎不变, 但目标回波通道中的直达波及多径干扰会减小, 接收机的动态范围要求可降低, 减少外辐射源雷达的成本;
- (3) 需要综合考虑外辐射源雷达的监控区域、相干积累增益性能、接收机的动态范围和定位精度等重要因素, 选择合适的基线距离和接收站位置.

5 结论

在外辐射雷达系统中, 非合作的民用发射信号是事先未知的, 且在发射功率一定的条件下, 随着基线距离的增加, 参考通道信噪比会逐渐下降, 这将导致常规雷达的相干积累增益计算方法在外辐射源雷达中不适用. 本文在分析外辐射源雷达参考通道和目标回波通道信号特点的基础上, 推导了外辐射源雷达的相干积累增益与参考通道信噪比、信号有效带宽和相干积累时间的关系, 为预测其探测威力提供了理论基础. 然后验证和分析了相干积累增益与参考通道信噪比之间的关系, 并由此对外辐射源雷达布站的基线选择提出了一些建议.

参考文献:

[1] GRIFFITHS H D, BAKER C J. Passive coherent location radar systems. Part 1: Performance prediction [J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 153-159.
 [2] 唐小明, 何友, 等. 基于机会发射的无源雷达系统发展评

述[J]. 现代雷达, 2002, 24(2): 1- 6.

TANG Xiaoming, HE You. An overview of development of passive radar system based on transmitters of opportunity[J]. Modern Radar, 2002, 24(2): 1- 6. (in Chinese)

- [3] 陶然, 王越. 分布式无源检测信息系统研究进展[J]. 深圳大学学报理工版, 2004, 21(4): 101- 106.

TAO Ran, WANG Yue. Research on the development of distributed passive detection system[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2004, 21(4): 101- 106. (in Chinese)

- [4] HOWLAND P. Editorial: Passive radar systems[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 105- 106.

- [5] HOWLAND P E, MAKSIMUK D, et al. FM radaio based bistatic radar[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 107- 115.

- [6] HOYUELA C M, TERZUOLI J, et al. Determining possible receiver locations for passive radar[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 206- 214.

- [7] SKOLNIK M. Introduction to radar systms, 3rd Edition[M]. USA: McGraw-Hill, 2000.

- [8] BAKER C J, GRIFFITHS H D. Passive coherent location radar systems. Part 2: Waveform properties[J]. IEE Proc Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 160- 168.

- [9] SAINI R, CHERNIAKOV M. DTV signal ambiguity function analysis for radar application[J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig, 2005, 152(3): 133- 142.

- [10] 高志文, 陶然, 等. DVB-T 辐射源雷达信号模糊函数的副峰分析与抑制[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 505- 509.

GAO Zhiwen, TAO Ran, et al. Side peaks analysis and suppression of DVB-T Signal Ambiguity Function for Passive Radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3): 505- 509. (in Chinese)

作者简介:



高志文 男, 1978 年 4 月出生于山西省忻州市. 现为北京理工大学电子工程系在读博士生. 研究方向为信号处理及其在雷达、通信和信息安全中的应用.

E mail: zwgao@sina.com



陶 然 男, 1964 年 11 月出生于安徽南陵, 1993 年于哈尔滨工业大学获博士学位. 国家杰出青年科学基金获得者. 现任北京理工大学信息安全与对抗研究中心主任, 信息安全与对抗学科首席教授、博士生导师. 兼任中国雷达行业协会副理事长, 中国电子学会会士和青年工作委员会副主任, 《兵工学报》常务编委, IEEE 高级会员. 在 IEEE Trans、中国科学和电子学报发表论文 50 余篇. 以第一作者出版信号处理领域著作和教材 2 部. 完成和承担多项国家自然科学基金重点项目、部委重点项目和产业化项目. 研究方向: 通信与信息系统、信息安全与对抗.

E mail: rantao@bit.edu.cn