

雷达杂波相关功率谱特性的 AR 模型及其模拟

朱 灿 焰

何佩琨 毛二可

(电子与信息工程系)

(北京理工大学)

摘 要 研究了雷达相关杂波功率谱特性的 AR 模型及其模拟方法^[9]。在现有功率谱估计方法的基础上,提出了具有约束条件的修正 LEVISON 递推算法,并同时给出了 AR 模型阶数的估计方法^[9]。最后,给出了计算机仿真结果^[9]。

关键词 相关杂波;AR 模型;BURG 算法;LEVISON 算法

分类号 TV 955.3

0 引 言

在雷达相干视频信号模拟中,杂波信号的模拟精度主要取决于其统计模型的精度^{[1](13)}。如用窄带随机过程表示杂波信号^[1,3]:

$$X_{RF} = \text{Re}[X(t) \exp(j\omega t)], \quad (1)$$

$$X(t) = X_c(t) + jX_q(t) = A(t) \exp(j\theta(t)) \quad (2)$$

式中: $X(t)$ 为复包络; $X_c(t)$ 、 $X_q(t)$ 分别为同相正交分量; $A(t)$ 为幅度; $\theta(t)$ 为相位;则杂波的统计特性可从其功率谱分布和 $A(t)$ 的概率密度分布两个方面进行模型描述^[13]。迄今用来描述雷达杂波幅度分布的统计模型主要有:瑞利分布、对数正态分布、韦伯分布和 K 分布等;相关功率谱特性主要有高斯分布和立方谱或 n 次方谱^{[4,5](13)}。目前,任意幅度分布的相关杂波的模拟方法有两种^[3,6,7],它们分别是广义维纳过程的零记忆非线性变换(ZMNL)法和球不变随机过程(SIRP)法^[13]。但无论采用哪一种方法,均首先需要产生出具有所要求的功率谱特性的相关复高斯随机过程^[13]。因此,本文仅研究相关高斯杂波的模型及其模拟方法^[13]。

1 杂波的相关谱特性及其 AR 谱估计模型

在相干视频信号模拟时,一般假设雷达回波的窄带随机过程满足广义平稳随机过程的条件,因而,可用图 1 所示的模型来得到具有一定要求的功率谱特性的相关杂波^[13]。图 1 中, $W(k)$ 是均值为零的白高斯杂波; $Y(k)$ 为模拟的相干视频信号; $H(z)$ 引入相干信号所需要的相关功率谱特性^[13]。根据图 1 可知,相关高斯杂波 $Y(k)$ 是在 $W(k)$ 激励下,滤波器 $H(z)$ 的响应^[13]。

$$\xrightarrow{W(k)} H(z) \xrightarrow{Y(k)}$$

图 1 产生相关杂波的过程

我们知道,具有高斯幅度分布特性的随机过程序列,经线性变换后,其高斯幅度分布特性不变^{[1](13)}因此,模拟相关高斯随机杂波,实际上就是要设计出具有所需功率谱相关特性的数字滤波器 $H(z)$ (13)前文已述,实际雷达环境杂波的功率谱统计特性主要用高斯谱或 n 次方谱模型来描述^[1,4~7],分析这两种分布特性不难发现,杂波功率大部分集中在半功率点或特征频率范围内,即具有一定程度的极值函数特征,根据 BURG 定理^[10],可用有限阶自回归(AR)过程模型近似⁽¹³⁾因此,相关高斯杂波 $Y(k)$ 可表示为 AR 模型的输出序列,即有

$$Y(k) = - \sum_{i=1}^p A_i Y(k-i) + W(k) \quad (3)$$

式(3)中, $A_i, i=1, 2, \dots, p$, 为 AR 模型的各阶系数; p 为 AR 模型的阶数;激励白噪声高斯序列 $W(k)$ 是广义平稳随机过程,其均值为零,方差 σ_w^2 (13)

根据现代谱估计理论,AR 功率谱特性的估计式为^[10]

$$P(\omega) = \sigma_w^2 / \left| 1 - \sum_{i=1}^p A_i \exp(-j\omega) \right|^2 \quad (4)$$

由式(4)知,只要能估计出 AR 模型的各阶系数 $A_i, i=1, 2, \dots, p$, 使其功率谱估计特性具备或接近所要求的相关谱特性,就可以在白高斯噪声的激励下,得到所模拟的相关杂波序列 $Y(k)$ (13)

用现代功率谱估计方法确定 AR 模型的各阶系数,一般需要首先产生出相关杂波的样本序列⁽¹³⁾为此,引入独立随机相位因子序列 $\{\xi\}$, 它的各分量均值为零,且满足条件

$$|\xi|^2 = 1 \quad (5)$$

假设 $Y(k)$ 的功率谱密度函数为 $P_{YY}(\omega)$, 令

$$Y(n) = \xi \sqrt{P_{YY}(2\pi\Delta f) \Delta f}; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (6)$$

式中, Δf 是抽样间隔; N 为频域采样点数⁽¹³⁾

很显然, $Y(n)$ 满足总体平均功率谱特性的要求,对其进行逆付里叶变换,就可得到相关杂波的一次样本序列 $Y(k)$ (13)

$$Y(k) = F^{-1}[Y(n)]; \quad n, k = 0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (7)$$

式(7)中, $F^{-1}[\cdot]$ 代表逆付里叶变换运算⁽¹³⁾

因为离散随机过程的采样是独立的^[1], 所以,根据 $Y(n)$ 所得到的一组 $Y(k)$ 观测值能代表相关杂波随机过程的总体⁽¹³⁾然而,当且仅当 ξ 的两个正交分量的概率分布均是零均值高斯分布时, $Y(k)$ 才是零均值高斯分布的⁽¹³⁾所以,利用现有的各种最大熵功率谱估计方法,即可估算出 AR 系数⁽¹³⁾又实际杂波单元的杂波样本数据较短,所以一般选用 BURG 算法^{[8~10](13)}

不难想象,使用 BURG 算法所得到的 AR 谱的理想结果,应是给定杂波的相关功率谱特性,但因所引入的独立随机相位因子序列 $\{\xi\}$ 的独立性、高斯分布特性等,与所要求的理想特性总是存在随机误差,故一般功率谱估计方法所得到的结果将受到随机相位因子波动的影响⁽¹³⁾尽管能通过蒙特卡洛模拟方法在一定程度上消除该随机误差的影响,但均方误差下降的数量级仅与重复次数的平方根成反比^[1,2],因而,上述模拟方法需较大的计算量,才能够达到所要求的模拟精度⁽¹³⁾此外,AR 模型阶数 p 的值是否准确,对估计谱的影响也较大⁽¹³⁾

2 修正的 LEVISON 估计方法

在雷达相关视频信号模拟中,研究与所模拟的环境杂波特性尽量相吻合的统计模型,以及

产生能满足模拟目的的最有效的计算方法,是雷达信号模拟的关键点^[13]对于相关高斯杂波的模拟,尽管 AR 谱模型能满意地模拟出各种所要求的相关谱特性,但已有的计算方法均存在一定的局限性^[13]上述算法不能确定 AR 模型的阶数,且会受到随机相位因子波动的影响^[13]这是因为相位因子并非理想的零均值高斯随机过程序列所引起的^[13]事实上,相关杂波 $Y(k)$ 的相关功率谱特性由式(7)给出,故直接对式(7)进行频域采样,可得

$$P_{YY}(n) = P_{YY}(2\pi \Delta f) \Delta f; \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

式中, Δf 是抽样间隔; N 为频域采样点数^[13]对上式作逆付里叶变换,即可得到

$$R_{YY}(k) = F^{-1}[P_{YY}(n)]; \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (9)$$

根据付里叶变换的性质^[10], $R_{YY}(k)$ 为 $Y(k)$ 的自相关函数^[13]由于已知杂波序列的自相关函数,同时考虑到实际杂波序列的长度短,故选择 LEVISON 算法估计 AR 滤波器的系数,既可避免随机相位因子的影响,又能满足短序列样本估计的精度^[13]

在估算出 AR 系数 $\{a_i\}$ 后,就可使用式(4)计算 AR 功率谱,即杂波的相关功率谱特性^[13]然而,实际杂波的功率谱函数并非理想的 AR 谱模型,故在实际估计滤波器系数 $\{a_i\}$ 的具体过程中,LEVISON 算法不能保证前向预测均方误差 ρ_m 一定收敛,也会出现反射系数 K_m 的幅值趋于 1 的情况^[10],从而使滤波器不稳定或计算结果溢出,为此,我们施加了一定的约束条件,以防止这类情况的发生^[13]此外,根据 LEVISON 递推算法的性质^[10],假若功率谱函数符合真实 p 阶 AR 模型,则 $m \geq p$ 时,前向预测均方误差 ρ_m 等于 ρ_p 不变,且在正确模型阶数时首先达到它的最小值^[13]由此,对 LEVISON 递推算法进行适当修正,就可以在估算 AR 滤波器系数的同时判断阶数 p ^[13]在实际进行 AR 滤波器系数的估算过程中,我们采用了简单实用的判据,即选择阶数收敛因子 α 并比较 ρ_m 和 ρ_{m-1} ,如 $\rho_m / \rho_{m-1} > \alpha$ ($\alpha \leq 1$ 的常数),则近似认为 m 等于 p ^[13]结合约束条件,就可得到 AR 滤波器阶数的估计值^[13]

综上所述,修正的约束 LEVISON 递推算法的具体步骤为

(1) 令 $m=1$, 计算初始值

$$\begin{aligned} A_1^1 &= -R_{YY}(1)/R_{YY}(0), \\ \rho &= (1 - |A_1^1|^2) R_{YY}(0) \end{aligned} \quad (10)$$

(2) 判断 AR 模型的阶数

令 $\alpha = \rho_m / \rho_{m-1}$, 若 α 大于某一常数, 则 $m=p$, 结束递推; 或者, 若 ρ_m 趋于 0, 结束递推, 否则继续进行^[13]

(3) 令 $m=m+1$, 计算反射系数和滤波器系数

$$\begin{aligned} A_m^m &= -[R_{YY}(m) + \sum_{l=1}^{m-1} A_l^{m-1} R_{YY}(m-l)] / \rho_{m-1} \\ K_m &= A_m^m \end{aligned} \quad (11a)$$

$$A_n^m = A_n^{m-1} + K_m A_{m-n}^{m-1}; \quad n = 1, 2, \dots, m-1 \quad (11b)$$

(4) 判断 K_m 是否满足约束条件^[13]是, 则计算预测误差功率

$$\rho_m = (1 - |K_m|^2) \rho_{m-1} \quad (12)$$

否则, 修正反射系数 K_m , 并重新计算式(11a, 11b)^[13]

(5) 重复步骤(2)~(4), 直至 $m=N/2$ ^[13]

根据文献[10], 一般假设最高阶数为样本点数的一半, 但在实际估算过程中, 由于自相关

函数具有对称性,因此,我们假设最高阶数的值是 $N/2$ ^[13]由付里叶变换与线性相关运算之间的关系可知,此值相当于样本长度^[13]对相同长度的样本而言,实际估算 AR 模型最高阶数的范围增大了一倍^[13]

由于 LEVISON 算法是直接利用给定相关功率谱模型所得到的自相关函数进行 AR 谱估计的,因此,本算法所得到的估计结果应是最佳逼近理想功率谱的估计结果^[13]

3 计算机模拟结果

为检验上述算法及有关结论的正确性,选用了两种典型的杂波功率谱特性模型进行计算机模拟,它们分别是用两个半功率点之间的频谱宽度来定义的高斯谱模型和 n 次方谱模型^[13]高斯谱模型和 n 次方谱模型的具体形式分别由式(13)和(14)定义^[13]其中高斯谱的形式为

$$P_{XX}(f) = \exp[-a((f - f_0)/f_{3db})^2], \quad (13)$$

式(13)中, f_0 是频谱最大点位置,在实际模拟中,为简便起见,假设 $f_0 = 0$; f_{3db} 是两半功率点间宽度; a 是一个常数,其值为 $a = 2/\ln 2 = 1.665$ ^[13] n 次方谱的形式为^[4]

$$P_{XX}(f) = 1/[1 + ((f - f_0)/f_c)^n], \quad (14)$$

式(14)中, n 的取值范围在 $2 \sim 5$ 之间,模拟时令 $n = 2.5$; f_0 的意义和取值同上; f_c 被称之为杂波的特征频率,其值由下式确定

$$f_c = d \exp(\beta v) \text{ (Hz)} \quad (15)$$

对地杂波而言, $d = 1.333 \text{ Hz}$; $\beta = 0.1356$ 为常数; v 是风速(kn),风速的范围一般在 $0 \sim 25 \text{ kn}$ ^[13]

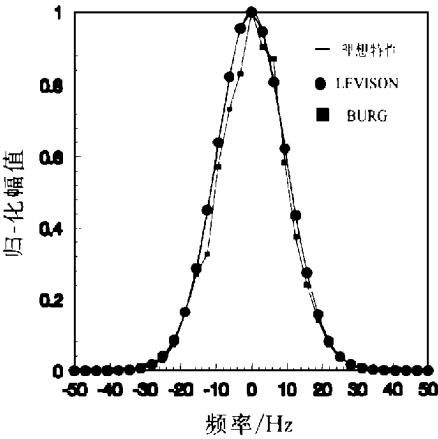
首先,利用本文所提出的修正的 LEVISON 算法研究了上述两种相关功率谱特性的 AR 模型估计阶数,部分结果如表 1 所示^[13]

表 1 是在如下条件下得到的:其中高斯谱杂波的频域宽度为 $5f_{3db}$; n 次方谱的频域宽度为 $3f_c$,且在进行阶数估计时,对采样数据作了加汉宁窗处理^[13]从表 1 中可以看出:AR 模型的阶数主要由相关杂波的类型或性质确定,而杂波功率谱的宽度等因素对其影响较小;约束收敛因子 α 和采样点数 N 对 AR 模型阶数的估计结果有一定的影响,但在某一 α 值时, N 大于某数值后,也即达到一定的采样精度后,AR 模型的阶数基本上是不变的^[13]如在 $\alpha = 0.97$ 时,采样点 N 大于或等于 128 时的 n 次方谱 AR 阶数的估计结果均为 8^[13]此外,还可以看出:由于 n 次方谱特性较之于高斯谱特性具有更明显的极点特征,因而其 AR 谱模型的阶数较小^[13]

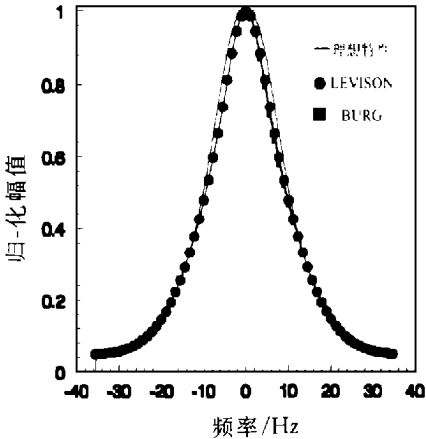
图 2 是利用上述算法得到的 AR 谱及其对应的理想特性^[13]其中,利用 BURG 算法估计 AR 谱时所给定的阶数 p ,为对应的 LEVISON 算法所得到的阶数,其估计结果经过了 100 次平均^[13]图 2(a) 为高斯谱的估计结果和理想高斯特性^[13]模拟时, $f_{3db} = 40 \text{ Hz}$,频域宽度为 $5f_{3db}$,采样数为 512,收敛因子 $\alpha = 0.98$;图 2(b) 是 n 次方谱的估计结果及其理想特性^[13]模拟时令 $v = 15 \text{ kn}$,频域宽度为 $7f_c$,采样数也为 512,收敛因子 $\alpha = 0.97$ ^[13]从图 2 不难看出,修正的 LEVISON 算法所得到的 AR 模型谱的估计结果更接近于理想的已知杂波谱特性;利用 BURG 算法估计出的 AR 谱特性趋近于 LEVISON 算法的估计结果,在高频段几乎重合,由此也说明了本文中修正的 LEVISON 算法所估计出的杂波相关功率谱的 AR 模型的阶数是正确的^[13]

表 1 AR 谱模型阶数的估计结果

α	抽样 长度	高斯谱相关特性 f_{3db}/Hz			n 次方谱相关特性 ($n=2.5$) v/kn		
		10	25	40	10	15	20
0.93	64	25	25	25	6	6	6
	128	24	24	24	5	5	5
	256	23	23	23	5	5	5
	512	47	47	47	5	5	5
0.95	64	26	26	26	7	7	7
	128	25	25	25	6	6	6
	256	24	24	24	6	6	6
	512	48	48	48	6	6	6
0.97	64	26	26	26	9	9	9
	128	26	26	26	8	8	8
	256	24	24	24	8	8	8
	512	48	48	48	8	8	8
0.98	64	27	27	27	11	11	11
	128	26	26	26	10	10	10
	256	25	25	25	9	9	9
	512	48	48	48	9	9	9



(a) 高斯谱的估计结果
及其理想特性



(b) n 次方谱的估计结果
及其理想特性

图 2 计算机仿真结果^[13]

图 2 中估计结果与理想特性之间的误差,主要是因 AR 模型的模拟精度及离散抽样引起的^[13]尽管 BURG 算法估计结果的误差稍大些,但可以通过增大重复平均次数进一步降低误差^[13]总平均误差功率以及最大绝对误差值均能满足雷达模拟精度的要求^[13]离散抽样误差还可以通过内插方法得到改善^[13]

4 结 论

本文利用修正的 LEVISON 算法对雷达杂波的相关功率谱特性的 AR 模型进行了较深入地研究,给出了两种常见杂波功率谱特性的 AR 模型的阶数和 AR 谱特性的估计结果,并与 BURG 算法的估计结果进行了比较,得到了与理论分析相一致的结论¹⁹。计算机仿真结果证明了:用 AR 模型来描述常用雷达杂波的功率谱特性是正确的;在合理的模型阶数下,AR 模型谱的误差精度能满足雷达杂波模拟的要求¹⁹。因此,本文提出的方法可实际应用到雷达系统模拟的工程技术中¹⁹。

参 考 文 献

- 1 R L 米切尔¹⁹雷达系统模拟¹⁹陈训达译¹⁹北京:科学出版社,1982
- 2 方再根¹⁹雷达杂波的计算机模拟¹⁹北京工业学院学报,1985,(1):32~43
- 3 E Conte, M Longo, M Lops· Modeling and simulation of non-Rayleigh radar clutter· IEE Proc· F, 1991,138(2):121~130
- 4 D K Barton· Radars, Vol·5; Radar Clutter· Artech· House, INC., 1975
- 5 V Anastassopoulos, G A Lampropoulos· High resolution radar clutter classification· IEEE International Radar Conf., 1995, 662~667
- 6 W Stehwien· Statistics and correlation properties of high resolution X-band sea clutter· IEEE National conf., 1994,46~51
- 7 E Conte, M Longo· characterisation of radar clutter as a spherically invariant random process· IEEE Proc· F, 1987, 134(2):191~201
- 8 Fang Sujuan etc· Modeling and simulation of non-gaussian correlated clutter· IEEE International Radar Conf., Beijing: 1996,195~199
- 9 张戎宝¹⁹现代雷达杂波模拟的一些新方法¹⁹信号处理,1994,10(2):93~99
- 10 S M Kay· Modern spectral estimation· Theory and Application, Prentice-Hall, 1988

The AR Power Spectral Models for Coherent Clutters and Their Studies

Zhu canyan

(Electronic and Information Engineering Dept)

He Peikun Mao Erke

(Beijing Institute of Science and Technology)

Abstract The AR models for power spectral characteristics of coherent radar clutters and their simulating methods are studied in this paper· On the basis of existing methods, a modified LEVISON algorithm with constraint conditions and AR order estimation is put forward· Accordingly the computer simulating results are given as well·

Key words coherent clutter; AR model; BURG algorithm; LEVISON algorithm