

引用格式:蔡万勇,金加根,张朝伟,等.基于经度切割的雷达网威力模型及算法[J].电光与控制,2018,25(12):1-4. CAI W Y, JIN J G, ZHANG C W, et al. Longitude incision based radar net coverage: model and algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(12):1-4.

## 基于经度切割的雷达网威力模型及算法

蔡万勇, 金加根, 张朝伟, 王年生, 吕伟  
(空军预警学院, 武汉 430019)

**摘要:**针对雷达网探测威力范围解算中计算量大、速率低、精度差的问题,建立了3种程式雷达的垂直威力模型,并采用经度切割方法,建立了大地坐标系下的经纬度平面威力模型。将雷达网探测区域按等经度间隔切割成若干条块,形成条状雷达网,将网内各部雷达的经纬度平面威力投影到条状雷达网中,建立了经纬度雷达网威力条块模型,并给出了切割算法。通过30部雷达构成的雷达网仿真表明,该方法将两维数据量降为一维,减少了计算量,提高了速率,解决了复杂遮蔽边界问题,求得的球面面积更加准确,解决了雷达网威力解算问题。

**关键词:** 雷达网; 垂直威力; 平面威力; 经度切割

中图分类号: O213.2 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.12.001

## Longitude Incision Based Radar Net Coverage: Model and Algorithm

CAI Wan-yong, JIN Jia-gen, ZHANG Chao-wei, WANG Nian-sheng, LYU Wei  
(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** Current radar net coverage calculation has such deficiencies as huge calculation amount, low velocity and low precision. To solve the problems, the radar models of vertical coverage of three frequency bands are built, and the planar coverage model in geodetic coordinates is built by using the longitude incision method. The detection area of the radar net is incised into a couple of strips with the same longitudinal intervals so that a strip-shaped radar net is formed. The planar coverage of each radar in the net is projected onto the strip-shaped radar net. The strip-shaped model of radar net coverage is built, and an incision algorithm is given. A simulation was carried out on the radar net composed of 30 radars. The result shows that the proposed method reduces the two-dimension calculation amount to one dimension, which lowers the calculation amount, improves the velocity, solves the complex problem of masking boundary, acquires a more accurate spherical area, and solves the problem of the calculation of radar net coverage.

**Key words:** radar net; vertical coverage; planar coverage; longitude incision

### 0 引言

威力范围是衡量雷达网性能和优化布站的重要指标,可以用数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据对其平面探测威力进行计算<sup>[1-4]</sup>,或采用复杂区域图形“橡皮擦”处理法<sup>[5-7]</sup>,但是对复杂遮蔽边界的解算仍较为繁琐,为此有学者提出了采用数据融合和可视化仿真方法<sup>[8-9]</sup>,但仍有以下不足:采用DEM栅

格二维遍历法,计算量大、速率低,对于几部雷达构成的小区域网的计算效果较好,而对于几十部、上百部雷达构成的大区域网的计算效果欠佳;均是在直角坐标系下求解的平面威力,而不是雷达网的球面威力,故而在存在误差;直角坐标下求解的边界轮廓点坐标,不能满足雷达网情报系统中经纬度坐标的要求。为此,提出了经度切割法,以解决上述问题。

### 1 3种程式雷达垂直威力模型

米波雷达(A)、分米波雷达(B)、厘米波雷达(C)的垂直威力分别为<sup>[10]</sup>

$$R_A(\varepsilon) = R_m \cdot F(\varepsilon) \cdot 2\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}h_a \sin \varepsilon\right) \cdot \Gamma(\varepsilon) \quad (1)$$

收稿日期:2018-04-19

修回日期:2018-07-15

基金项目:国家自然科学基金(61601509);博士后科研基金(2016 M603045)

作者简介:蔡万勇(1981—),男,江苏射阳人,博士,讲师,研究方向为雷达装备作战运用与效能仿真。

$$R_B(\varepsilon) = R_m \cdot (F(\varepsilon - \varepsilon_0) + F(-\varepsilon - \varepsilon_0)D) \cdot \Gamma(\varepsilon) \quad (2)$$

$$R_C(\varepsilon) = R_m \cdot F(\varepsilon) \cdot \Gamma(\varepsilon) \quad (3)$$

式中:  $R_m$  为最大探测距离;  $F(\varepsilon)$  为天线垂直方向系数;  $h_a$  为天线架高;  $\Gamma(\varepsilon)$  为遮蔽修正。

实例1 设米波雷达A技术参数为:架高500 m,最大作用距离360 km,波长1.2 m。阵地遮蔽情况如表1所示。

表1 阵地遮蔽情况

Table 1 Parameters of terrain masking

序号	方位/(°)	与雷达距离/km	高度/m	张角/(°)
1	60	120	4500	5
2	150	115	4200	4
3	210	90	4000	4
4	315	50	3000	3

雷达A在方位60°上的垂直探测威力如图1所示。

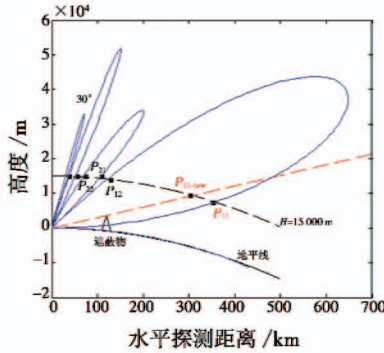


图1 60°方位上雷达A的垂直探测威力

Fig.1 Vertical coverage at 60° azimuth of Radar A

## 2 雷达平面威力模型

### 2.1 直角坐标系下的平面威力模型

垂直威力  $R(\varepsilon)$  在水平方位上旋转一周,由高度层切线  $\widehat{H}_{R(\varepsilon)}$  扫掠形成的球面就是平面威力  $S_{H_{xyz}}$ 。

$$S_{H_{xyz}} = \int_0^{2\pi} \widehat{H}_{R(\varepsilon)} d\alpha \quad (4)$$

模型解算步骤如下所述。

1) 求每个  $\alpha$  方位上  $H$  高度层的探测距离  $\widehat{H}_{R(\varepsilon)}$ 。图1中,垂直面上  $N$  个波束中,有  $M$  个波束与高度线  $H$  相交,形成  $M$  个线段  $[P_{i1} P_{i2}]$ ,则

$$\widehat{H}_{R(\varepsilon)} = \bigcup_{i=1}^M [P_{i1} P_{i2}] \quad (5)$$

2) 计算遮蔽线与高度层的交点  $P_{i_{new}}$ ,用  $P_{i_{new}}$  对  $\widehat{H}_{R(\varepsilon)}$  中的  $[P_{i1} P_{i2}]$  线段进行修正,从而得到遮蔽影响下的最大作用距离。

3)  $\alpha = \alpha + \Delta\alpha$ ,若  $\alpha \geq 360^\circ$ ,求得极坐标系下的  $S_{H_{\alpha\beta R}}$ 。

4) 将极坐标系下的  $S_{H_{\alpha\beta R}}$  转换为直角坐标系下的  $S_{H_{xyz}}$ 。

### 2.2 大地坐标系下的经纬度平面威力模型

切割思路:先将直角坐标系下的  $S_{H_{xyz}}$  转换为大地

坐标系下的平面威力  $S_{H_{LBH}}^{[11]}$ ,如图2所示,再按等经度间隔  $\Delta l$  对  $S_{H_{LBH}}$  进行条块切割,即

$$S_{H_{LBH}} = \int_{L_{min}}^{L_{max}} \sum_{i=1}^{2M} \left[ (B_{Q_{pi}}(l) - B_{Q_{pn}}(l)) \cdot 2R_e^2 \cdot \cos\left(\frac{B_{Q_{pi}}(l) + B_{Q_{pn}}(l)}{2}\right) \right] dl \quad (6)$$

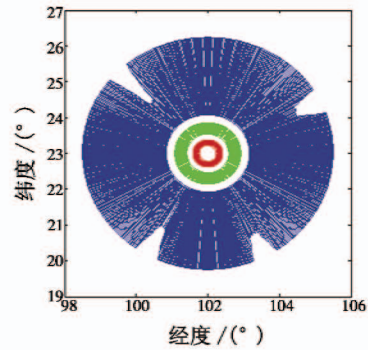


图2 大地坐标系下雷达A的平面威力

Fig.2 Planar coverage of Radar A in geodetic coordinate

对实例1 雷达A在15 000 m高度层的平面威力,按0.01°等经度进行切割,如图3所示,对应的经纬度如表2所示,球面探测面积为  $3.5842 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。

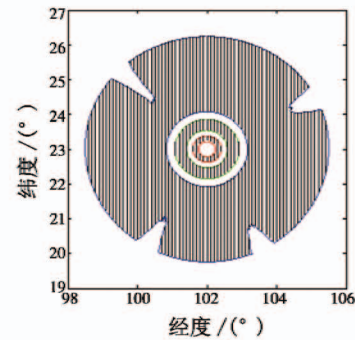


图3 经度切割的平面威力

Fig.3 Planar coverage with longitude incision

表2 雷达A威力的经纬度表征

Table 2 Longitude and latitude of Radar A coverage (°)

段数	经度/(°)								
	98.51	98.52	...	104.44	104.45	104.46	...	105.48	105.49
$n$	1	1		6	6	6		1	1
第1段	23.27	23.38		25.34	25.33	25.32		23.38	23.27
	22.79	22.69		24.32	24.33	24.34		22.69	22.79
第2段				24.26	24.25	24.23			
				24.22	24.22	24.22			
⋮				⋮	⋮	⋮			
第6段				24.07	24.06	24.06			
				20.69	20.70	20.71			

## 3 雷达网平面威力模型

### 3.1 经纬度雷达网威力条块模型

假设雷达网由  $W$  部雷达构成,在  $H$  高度层上,每部

雷达的经纬度威力矩阵为  $E_{H\_LBH\_i} (i = 1, 2, \dots, W)$ , 平面威力面积为  $S_{H\_LBH\_i}$ 。

$$E_{H\_LBH} = \bigcup_{i=1,2,\dots,W} E_{H\_LBH\_i} \quad (7)$$

$$S_{H\_LBH} = \bigcup_{i=1,2,\dots,W} S_{H\_LBH\_i} =$$

$$\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \sum_{j=1}^{M(l)} \left[ (B_{j1}(l) - B_{j2}(l)) \cdot 2R_e^2 \cdot \cos\left(\frac{B_{j1}(l) + B_{j2}(l)}{2}\right) \right] dl \quad (8)$$

式中： $L_{\min}, L_{\max}$  分别为最小和最大经度； $M(l)$  为经度线  $l$  上纬度段数； $B_{j1}(l), B_{j2}(l)$  分别为在经度线  $l$  上第  $j$  个纬度段的高点、低点纬度。切割示例如图 4 所示。

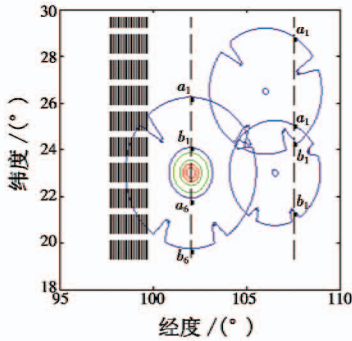


图 4 3 部雷达在  $H = 15\ 000\ \text{m}$  威力切割示例

Fig.4 Incision of three radars' coverage at a height of 15 000 m

### 3.2 经度切割算法

经度切割算法流程如下所述。

1) 计算  $L_{\min}, L_{\max}$ 。令  $l_{\min\_i}, l_{\max\_i}$  分别为第  $i$  部雷达  $E_{H\_LBH\_i}$  中的最小和最大经度, 则  $L_{\min} = \min_{i=1,2,\dots,W} \{l_{\min\_i}\}$ ,  $L_{\max} = \max_{i=1,2,\dots,W} \{l_{\max\_i}\}$ 。

2) 对  $L_{\min}, L_{\max}$  进行等间隔处理。 $\Delta l$  取  $0.01^\circ$  可满足精度要求, 如图 4 中虚线所示, 生成雷达网经纬度矩阵  $E_{H\_LBH}$ , 如表 3 所示。

表 3 雷达网平面威力的经纬度表征

Table 3 Longitude and latitude of radar net coverage ( $^\circ$ )

段数	经度/ $^\circ$								
	$l_1$	$l_2$	$\dots$	$l_{j-1}$	$l_j$	$l_{j+1}$	$\dots$	$l_{\max-1}$	$l_{\max}$
$n$	$n$	$n$	$\dots$	$n$	$n$	$n$	$\dots$	$n$	$n$
第 1 段	$c_1$	$c_1$	$\dots$	$c_1$	$c_1$	$c_1$	$\dots$	$c_1$	$c_1$
	$d_1$	$d_1$	$\dots$	$d_1$	$d_1$	$d_1$	$\dots$	$d_1$	$d_1$
第 2 段	$c_2$	$c_2$	$\dots$	$c_2$	$c_2$	$c_2$	$\dots$	$c_2$	$c_2$
	$d_2$	$d_2$	$\dots$	$d_2$	$d_2$	$d_2$	$\dots$	$d_2$	$d_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
第 $n$ 段	$c_n$	$c_n$	$\dots$	$c_n$	$c_n$	$c_n$	$\dots$	$c_n$	$c_n$
	$d_n$	$d_n$	$\dots$	$d_n$	$d_n$	$d_n$	$\dots$	$d_n$	$d_n$

3) 将  $W$  部雷达的经纬度矩阵逐个并入到雷达网矩阵中, 以第  $i$  个  $E_{H\_LBH\_i}$  并入  $E_{H\_LBH}$  为例。

① 如果  $E_{H\_LBH\_i}(1, k) = E_{H\_LBH}(1, j)$ , 则可将向量  $E_{H\_LBH\_i}(:, k)$  并入  $E_{H\_LBH}(:, j)$ 。

② 令  $A = E_{H\_LBH}(:, j) = [l_j, n, c_1, d_1, c_2, d_2, \dots, c_n,$

$d_n]$ ,  $B = E_{H\_LBH\_i}(:, k) = [l_k, m, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_m, b_m]$ , 要将向量  $B$  并入向量  $A$ , 即将  $B$  中的  $m$  段纬度并入  $A$  中的  $n$  段纬度中。以第 1 个纬度段  $(a_1, b_1)$  并入向量  $A$  为例。

③ 纬度段  $(a_1, b_1)$  并入向量  $A$ 。 $(a_1, b_1)$  要与向量  $A$  中  $n$  段纬度做比较, 以  $(a_1, b_1)$  与  $(c_1, d_1)$  比较为例, 又分为 6 种情况:

- a  $a_1 \leq c_1$  &  $b_1 \geq d_1$ , 则不做处理;
- b  $a_1 > c_1$  &  $b_1 \leq c_1$  &  $b_1 \geq d_1$ , 则  $a_1$  替换  $c_1$ ;
- c  $a_1 \leq c_1$  &  $a_1 \geq d_1$  &  $b_1 < d_1$ , 则  $(a_1, b_1)$  与  $(c_2, d_2, \dots, c_n, d_n)$  做进一步比较;
- d  $a_1 > c_1$  &  $b_1 < d_1$ , 则  $a_1$  替换  $c_1$  后, 做进一步比较;
- e  $b_1 > c_1$ , 则  $A = [l_j, n + 1, a_1, b_1, c_1, d_1, c_2, d_2, \dots, c_n, d_n]$ ;
- f  $a_1 < d_1$ , 做进一步比较。

4) 采用式(8), 求得  $E_{H\_LBH}$  中每个条块的面积, 最后求和得到雷达网威力面积  $S_{H\_LBH}$ 。

## 4 仿真分析

### 4.1 实例

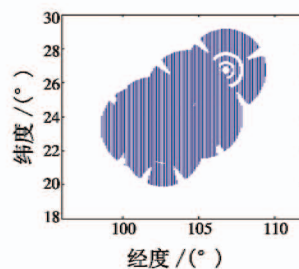
假设某地区雷达网由 30 部雷达构成, 其中, 米波 A 雷达 10 部, 分米波 B 雷达 10 部, 厘米波 C 雷达 10 部。架设坐标如表 4 所示。

表 4 30 部雷达架设坐标

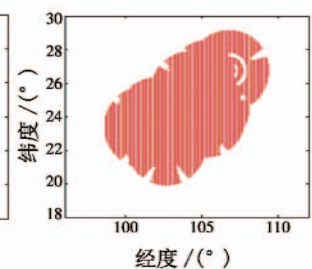
Table 4 Deployed coordinate of 30 radars ( $^\circ$ )

雷达类型	雷达编号						
	1	2	3	$\dots$	8	9	10
A	103.45	103.44	104.44	$\dots$	99.97	104.00	104.35
	24.65	23.72	23.16	$\dots$	22.60	25.20	25.91
B	103.45	103.55	105.32	$\dots$	102.83	103.83	102.94
	24.65	24.75	23.60	$\dots$	25.13	25.21	25.20
C	103.42	104.45	105.32	$\dots$	102.83	104.35	102.94
	23.75	23.18	23.60	$\dots$	25.13	25.91	25.20

图 5a 为 10 部雷达 A 在 5000 m 高度层的威力, 图 5b ~ 图 5d 分别为 30 部雷达在 5000 m, 10 000 m, 15 000 m 高度层的威力, 球面探测面积为  $6.699 \times 10^5\ \text{km}^2, 8.342 \times 10^5\ \text{km}^2, 9.813 \times 10^5\ \text{km}^2$ 。表 5 为 10 部雷达 A 威力的经纬度表征。



a  $H=5000\ \text{m}$  的 10 部雷达 A 威力



b  $H=5000\ \text{m}$  30 部雷达的雷达网威力

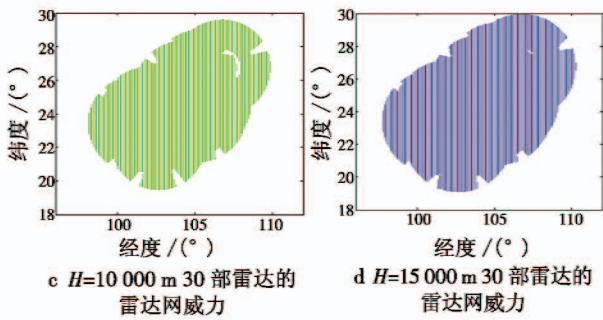


图5 雷达网威力的经度切割

Fig. 5 Longitude incision of radar net coverage

表5 10部雷达A威力的经纬度表征

Table 5 Longitude and latitude of coverage of 10 Radar A (°)

段数	经度/(°)								
	98.58	98.59	...	106.89	106.90	106.91	...	109.39	109.40
<i>n</i>	1	1	6	6	6	1	1		
第1段	23.54	23.64	29.13	29.13	29.13	26.99	26.89		
	23.22	23.11	27.78	27.78	27.78	26.46	26.57		
第2段			27.56	27.55	27.55				
			27.24	27.23	27.23				
第3段			27.07	27.07	27.06				
			26.91	26.90	26.90				
第4段			26.50	26.51	26.52				
			26.34	26.34	26.35				
第5段			26.20	26.18	26.18				
			25.86	25.86	25.86				
第6段			25.85	25.85	25.84				
			22.07	22.08	22.09				

## 4.2 对比分析

### 1) 计算量。

采用经度切割算法,与相关文献中矩阵方法的计算量进行对比,如表6所示。可以看出,经度切割算法的计算量减小4~5个数量级,相应速率提高4~5个数量级,并且随着雷达网增大、雷达数 $N$ 增加、 $H$ 增高, $\Delta l$ 精度更高,速率比呈平方律增长。

表6 算法的计算量比较

Table 6 Computational comparison of algorithms

部数	$H/m$	计算量		$\Delta l/$ (°)	速率 比
		矩阵法	切割法		
10部 A	5000	$(109.40 - 98.58) \times$ $(29.14 - 19.86) \times 10^2$	$(109.40 - 98.58) \times$ 10	0.01	9280
10部 B	5000	$(108.12 - 98.77) \times$ $(28.51 - 20.49) \times 10^2$	$(108.12 - 98.77) \times$ 10	0.01	8020
10部 C	5000	$(107.48 - 99.84) \times$ $(27.27 - 22.09) \times 10^2$	$(107.48 - 99.84) \times$ 10	0.01	5180
30部	5000	$(109.40 - 98.58) \times$ $(29.14 - 19.86) \times 30^2$	$(109.40 - 98.58) \times$ 30	0.01	27 840
30部	10 000	$(109.89 - 98.10) \times$ $(29.58 - 19.41) \times 30^2$	$(109.89 - 98.10) \times$ 30	0.01	30 510
30部	15 000	$(110.27 - 97.72) \times$ $(29.94 - 19.06) \times 30^2$	$(110.27 - 97.72) \times$ 30	0.01	32 640

### 2) 精度。

① 单部雷达遮蔽区更精细。由图3和表3可得,

在方位 $60^\circ$ 上存在 $5^\circ$ 张角的遮蔽,使得米波雷达A在经度 $104^\circ \sim 104.48^\circ$ 范围内时,纬度线被分割为4~6个线段;在方位 $210^\circ$ 上存在 $4^\circ$ 张角的遮蔽,纬度线也被分割为3~4个线段。② 多部雷达遮蔽重叠区更精准。图4中的3部雷达交叉区相对复杂,采用经度线切割、纬度求交集方法,可以轻松去除复杂性,对复杂遮蔽边界解算精度更高。③ 雷达网经纬度表示和面积计算结果更精确。所用球面面积计算方法相比平面面积方法更加准确,更符合实际情况。

## 5 结论

将该方法应用于雷达组网抗干扰、反隐身作战仿真,解决了计算量大、速率慢、精度低的问题。通过对由几百部雷达组成的全国雷达网进行仿真,将以往解算中从经度、纬度两个维度遍历降为经度一个维度,计算量与雷达数量成线性关系,而不是平方律关系,计算用时下降到了秒级,同时能够轻松解决任何复杂遮蔽边界问题,求解面积更加准确。

## 参考文献

- [1] 甘刚,李桂祥,左治方.基于DEM的米波雷达阵地选择方法研究[J].空军预警学院学报,2014,28(3):186-188,198.
- [2] 程晓光,刘唐兴,杨新民.基于检飞威力图的防空雷达三维威力区计算[J].现代雷达,2017,39(5):8-12,16.
- [3] 王勋,姚佩阳,梅权.多无人机协同运动目标搜索问题研究[J].电光与控制,2016,23(8):18-22.
- [4] 王中杰,李侠,周启明,等.雷达实际平面探测威力模型与仿真算法研究[J].现代防御技术,2007,35(3):117-122.
- [5] 周启明,王中杰,李侠,等.雷达网威力仿真中的复杂区域图形处理算法[J].现代防御技术,2008,36(1):87-91,96.
- [6] 刘香岚,彭世蕤,南昊,等.地形遮蔽条件下雷达网探测威力计算[J].空军预警学院学报,2017,31(4):248-252.
- [7] 孙殿星,王国宏,涂三军,等.基于雷达组网的低可观测目标跟踪技术研究[J].电光与控制,2016,23(4):6-11.
- [8] 吴海涛,高园.雷达网中探测范围及雷达数目的讨论[J].火力与指挥控制,2014,39(s1):32-35.
- [9] 卞泓斐,杨根源.海上雷达网探测威力范围仿真分析[J].电光与控制,2015,22(11):76-80.
- [10] 李希希,张葆,洪永丰.红外系统对点源目标的作用距离估算模型[J].电光与控制,2016,23(3):16-18.
- [11] 刘先一,周召发,张志利,等.基于天文定位的坐标转换方法研究[J].电光与控制,2016,23(1):11-14.