

Dipl.-Ing. Gernot Hoyler, München

**Beschleunigte Integral-
gleichungsverfahren
zur Simulation von strahlungs-
gebundenen EMV-Problemen**

Reihe **21**: Elektrotechnik

Nr. **231**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Elektromagnetische Verträglichkeit	1
1.2	Numerische Verfahren zur EMV-Simulation	2
1.2.1	Vorteile der EMV-Simulation	2
1.2.2	Numerische Verfahren im Vergleich	3
1.2.3	Integralgleichungsverfahren im Frequenzbereich	4
2	Theoretische Grundlagen	6
2.1	Die retardierten Potentiale	6
2.2	Berechnung der Feldstärken	8
2.2.1	Allgemeine Beziehungen	8
2.2.2	Fernfeldnäherungen	9
2.2.3	Berechnung der abgestrahlten Leistung	12
2.3	Ideale Leiter im äußeren harmonischen Feld	12
2.3.1	Problemstellung	12
2.3.2	Eindeutigkeit	14
2.3.3	Integralgleichungen	14
2.3.4	Ideal leitende Flächen	17
3	Die Momentenmethode	19
3.1	Allgemeines	19
3.1.1	Zur Begriffsbildung	19
3.1.2	Lineare Operatorgleichungen	19
3.1.3	Ansatz für die Lösungsfunktion	20
3.1.4	Übergang auf ein lineares Gleichungssystem	20
3.2	Vektorbasisfunktionen	22
3.2.1	Vektorbasisfunktionen erster Ordnung	23
3.2.2	Basisfunktionen für ebene Dreieckelemente	24
3.2.3	Modellierung von Stromverzweigungen	25
3.3	Ein spezielles Gewichtungungsverfahren	26
3.4	Aufstellen des linearen Gleichungssystems	28
3.4.1	Berechnung der Impedanzmatrix	29
3.4.2	Berechnung der rechten Seite	30
3.4.3	Impedanzbehaftete Elemente	30

3.4.4	Konzentrierte Spannungsquellen	32
3.4.5	Berücksichtigung von Symmetrien	33
3.5	Numerische Auswertung der Integrale	34
3.5.1	Abspalten der Singularität	34
3.5.2	Numerische Integration	35
3.5.3	Automatische Selektion der passenden Formel	37
3.6	Beispiele	38
3.6.1	Ideal leitende Kugel	38
3.6.2	Auto mit sendender Antenne	41
3.6.3	Einfache Digitalschaltung	42
4	Iterative Lösungsverfahren	46
4.1	Verfahren der konjugierten Gradienten	46
4.1.1	Direkte vs. iterative Lösungsverfahren	46
4.1.2	Einige CG-Varianten	47
4.1.3	Die Residuumnorm	48
4.1.4	Verschiedene Einflußfaktoren	50
4.2	Vorkonditionierung	53
4.2.1	Prinzip der Vorkonditionierung	53
4.2.2	Jacobi-Vorkonditionierung	55
4.2.3	Überlappende Block-Vorkonditionierung	58
4.2.4	Band-Vorkonditionierung	59
4.3	Das FFS-Verfahren	60
4.3.1	Funktionsweise	60
4.3.2	Varianten	62
4.4	Beispiele	63
4.4.1	Ideal leitende Kugel	63
4.4.2	Auto mit sendender Antenne	64
4.4.3	Einfache Digitalschaltung	65
5	Multipolbeschleunigung	67
5.1	Multipolentwicklung der retardierten Potentiale	67
5.1.1	Separation der Helmholtz-Gleichung	67
5.1.2	Kugelflächenfunktionen	71
5.1.3	Additionstheorem der Greenschen Funktion	72
5.1.4	Multipolentwicklungen	73
5.1.5	Multipolentwicklungen der Teilgebiete	75
5.1.6	Stabilitätsprobleme bei tiefen Frequenzen	76
5.2	Die schnelle Multipolmethode (FMM)	78
5.2.1	Historisches	78
5.2.2	Die FMM für strahlungsgebundene EMV-Probleme	78
5.2.3	Funktionsweise	79
5.2.4	Mehrstufige Algorithmen	81
5.2.5	Komplexitätsanalyse	82

5.3	Beispiele	83
5.3.1	Ideal leitende quadratische Platte	83
5.3.2	Auto mit sendender Antenne	84
6	Zusammenfassung und Ausblick	86
Anhänge		89
A	Eindeutigkeitssatz	89
B	Korrekturterme für impedanzbehaftete Elemente	91
C	Analytische Integration der singulären Integrale	93
D	Integrationsfehler im eindimensionalen Fall	97
E	Analytische Lösung des Kugelproblems	101
F	Translationsoperatoren	105
Symbol-Liste		109
Literaturverzeichnis		113